



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

# DESARROLLO DE MODELOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

Tesis doctoral presentada por Pablo Aparicio Ruiz  
dentro del Programa de Doctorado en Organización Industrial y Gestión de  
Empresas.

Dirigida por el Dr. José Guadix Martín







UNIVERSIDAD DE SEVILLA

# DESARROLLO DE MODELOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

Tesis doctoral presentada por Pablo Aparicio Ruiz  
dentro del Programa de Doctorado en Organización Industrial y Gestión de  
Empresas.

Dirigida por el Dr. José Guadix Martín

El doctorando

El director

Sevilla, diciembre de 2013

*Desarrollo de modelos de eficiencia energética en el sector de la construcción*

Autor: Pablo Aparicio Ruiz

Director: José Guadix Martín

La siguiente página web contiene información sobre esta tesis y otros temas relacionados: <http://io.us.es/>

Texto impreso en Sevilla. Primera edición, diciembre de 2013.

---

La tesis *Desarrollo de modelos de eficiencia energética en el sector de la construcción* presentada por el doctorando Pablo Aparicio Ruiz bajo la supervisión del Dr. José Guadix Martín es requerimiento para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Sevilla.

El tribunal para su defensa designado por la Comisión de Doctorado está formado por los siguientes doctores:

**Presidente** Dr. \_\_\_\_\_

**Vocal** Dr. \_\_\_\_\_

**Vocal** Dr. \_\_\_\_\_

**Vocal** Dr. \_\_\_\_\_

**Secretario** Dr. \_\_\_\_\_

CALIFICACIÓN: \_\_\_\_\_

Fecha de la defensa: \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_ .

Firma del comité evaluador del doctorando:

El presidente

Los vocales

El secretario

Sevilla, a \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_ .



*Dedicatoria.*

A mi familia, a mis amigos, y a Pilar, gracias a su paciencia esta tesis  
es un árbol de dulces frutos.



## **Abstract**

Environmental sustainability is one of the main goals in the current challenges of our technological development. Our society is focused on finding new technologies aimed at saving energy.

There is a need to dominate all existing knowledge and experience necessary to make improvements in energy efficiency of buildings. The purpose of this thesis is the development of custom algorithms to improve the energy efficiency of both new and existing buildings.

This document is structured in two fields in which they have developed and analyzed the techniques and tools of interest or heuristic algorithms exist to speed time to resolution of problems. The first field refers to sustainable building, ensuring environmental quality and energy efficiency of a building throughout its life cycle. In this area it establishes a methodology for optimizing the building envelope or skin of a building and the active elements that comprise it, to study energy consumption and corresponding savings, considering the environmental impact and the cost of it. The second field refers to the adaptation of the technology to a new generation of air conditioning systems based on adaptive comfort. In this area establishes a methodology for optimization and control of information and system operating conditions, for allow a greater user satisfaction of a building on thermal comfort conditions and maximum indoor air quality with minimum energy consumption. Furthermore, a system of free hardware sensors is studied and designed.

In both blocks, no matter how expert you are, a professional or a user of a technological tool, it is almost impossible without the tools and procedures, they can make optimal decisions quickly and effectively.

This thesis presents and develops innovative control strategies can be adapted to any existing building, and allow a significant improvement in energy efficiency thereof, the conceptualization of these methodologies on models that integrate various environments and adapt to any given building to projects in these areas significant value.



## **Resumen**

La sostenibilidad ambiental es uno de los objetivos fundamentales en los actuales retos de nuestro desarrollo tecnológico. Nuestra sociedad está orientada en la búsqueda de nuevas tecnologías encaminadas al ahorro de energía.

Existe una necesidad de dominar todo el conocimiento existente y la experiencia necesaria para realizar mejoras en la eficiencia energética de los edificios. La finalidad de esta tesis es la elaboración de algoritmos personalizados para mejorar la eficiencia energética tanto de edificios nuevos como existentes.

Este documento se vertebra en dos campos en los cuales se han desarrollado y analizado las técnicas, las herramientas de interés y los algoritmos o heurísticas existentes que permiten agilizar el tiempo de resolución de los problemas. El primer campo, hace referencia a la edificación sostenible, que asegura la calidad ambiental y la eficiencia energética de un edificio durante todo su ciclo de vida. En este área se establece una metodología de optimización de la envolvente o epidermis de un edificio y de los elementos activos que la conforman, para estudiar el consumo energético y el ahorro correspondiente, considerando el impacto medioambiental y el coste de éste. El segundo campo, hace referencia a la adaptación de la tecnología a una nueva generación de sistemas de climatización basados en el confort adaptativo. En éste área se establece una metodología de optimización y control de la información y las condiciones de operación del sistema, para permitir el mayor grado de satisfacción de los usuarios de un edificio respecto de

las condiciones de confort térmico y la máxima calidad del aire interior con el mínimo consumo energético. Además, se estudia y diseña un sistema de sensores de hardware libre.

En ambos bloques, no importa lo experto que sea un profesional o un usuario de una herramienta tecnológica, es casi imposible que sin las herramientas y procedimientos adecuados, estos puedan tomar decisiones óptimas con rapidez y eficacia.

Este documento presenta y desarrolla estrategias innovadoras de control que pueden adaptarse a cualquier edificio existente, y que permiten una mejora significativa en la eficiencia energética de los mismos, la conceptualización de todas estas metodologías bajo modelos que permiten integrar diversos entornos y adaptarse a cualquier edificio confiere a los proyectos desarrollados en estas áreas un notable valor añadido.

## **Agradecimientos**

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial al Dr. D. José Guadix Martín, director de esta tesis, y al Dr. D. Luis Onieva Giménez por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa de la misma, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido por ambos a lo largo de estos años.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud a mis compañeros del Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas II, de los que tanto he aprendido en estos años. Agradecer también a mis compañeros de grupo de investigación Termotecnia de la Universidad de Sevilla su amistad y colaboración. Y a la Dra. Dña. Luisa Brotas y al Dr. D. Fergus Nicol de la London Metropolitan University, por su colaboración en esta investigación. Y a todos aquellos docentes que en mi trayectoria académica han depositado sus ganas y su empeño en mi aprendizaje.

Por último, agradecer a Dios por las bendiciones que me ha dado esta vida: Mi familia, sin cuyo amor, cariño y comprensión, no habría podido superar los momentos difíciles. Mis amigos por la compañía, la lealtad y el apoyo que me brindan. Y a Pilar, por su amor, su confianza y la felicidad que me aporta cada día.

Mi esfuerzo y dedicación es por ustedes.

*Gracias,*

Pablo Aparicio Ruiz

Diciembre de 2013



# Índice general

<b>Índice de figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>xxvii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación . . . . .	2
1.2 Objetivos . . . . .	4
1.3 Estructura . . . . .	4
 <b>I Estado del arte de las técnicas</b>	 <b>9</b>
 <b>2 Sistemas expertos y metodologías</b>	 <b>11</b>
2.1 Introducción . . . . .	11
2.2 Sistema experto . . . . .	12
2.2.1 Visión general . . . . .	12
2.2.2 Visión conceptual . . . . .	15
2.2.3 Diseño de sistemas expertos . . . . .	18
2.2.4 Desarrollo de un sistema experto . . . . .	19
2.2.5 Problemáticas y características . . . . .	20
2.2.6 Estructura general de un sistema experto . . . . .	22
2.2.7 Diferencia con los programas convencionales . . . . .	25
2.3 Metodologías . . . . .	26
2.3.1 Sistemas basados en reglas y sus aplicaciones . . . . .	26
2.3.2 Los sistemas basados en el conocimiento y sus aplicaciones	29

## ÍNDICE GENERAL

---

2.3.3	Las redes neuronales y sus aplicaciones . . . . .	30
2.3.4	Sistemas expertos difusos y sus aplicaciones . . . . .	32
2.3.5	Metodología orientada a objetos y sus aplicaciones . . . . .	32
2.3.6	Razonamiento basado en casos y sus aplicaciones . . . . .	33
2.3.7	Modelado y sus aplicaciones . . . . .	34
2.3.8	La arquitectura del sistema y sus aplicaciones . . . . .	35
2.3.9	Agentes inteligentes y sus aplicaciones . . . . .	35
2.3.10	Ontología y sus aplicaciones . . . . .	36
2.3.11	Metodología de base de datos y sus aplicaciones . . . . .	37
2.3.12	Conclusiones . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Sistemas de ayuda a la toma de decisiones</b>	<b>39</b>
3.1	Introducción . . . . .	39
3.1.1	Definiciones . . . . .	40
3.1.2	Principios de un DSS . . . . .	43
3.1.3	La toma de decisiones . . . . .	44
3.2	Conclusiones . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Técnicas de resolución</b>	<b>51</b>
4.1	Técnicas para la resolución de problemas . . . . .	51
4.2	Modelos probabilístico . . . . .	52
4.3	Lógica Difusa . . . . .	53
4.3.1	Introducción . . . . .	53
4.3.2	Ventajas e inconvenientes . . . . .	54
4.3.3	Etapas de la lógica difusa . . . . .	56
4.4	Redes neuronales . . . . .	62
4.4.1	Introducción . . . . .	62
4.4.2	Tipos de redes neuronales . . . . .	69
4.4.3	El perceptrón . . . . .	70
4.4.4	Perceptrones multicapa: Backpropagación . . . . .	71
4.4.5	Red de Hopfield . . . . .	74
4.4.6	Modelo de Kohonen . . . . .	75
4.5	Meta-heurísticas . . . . .	76
4.5.1	Meta-heurísticas basadas en la trayectoria . . . . .	82

## ÍNDICE GENERAL

---

4.5.2	Meta-heurísticas basadas en población . . . . .	90
4.5.3	Algoritmo genético . . . . .	93
4.6	Sistemas multi-agentes . . . . .	99
4.6.1	Introducción . . . . .	99
4.6.2	¿Qué son los Agentes? . . . . .	100
4.6.3	Sistemas multi-agentes . . . . .	104
4.6.4	Coordinación, colaboración y cooperación . . . . .	105
4.7	Lenguajes de programación . . . . .	112
<b>5</b>	<b>Conclusiones de interés para el desarrollo de la tesis</b>	<b>115</b>
<b>II</b>	<b>Edificación sostenible</b>	<b>117</b>
<b>6</b>	<b>Diseño y desarrollo de edificios</b>	<b>119</b>
6.1	Introducción . . . . .	119
6.2	Motivaciones . . . . .	124
6.2.1	Motivaciones económicas . . . . .	126
6.2.2	Motivaciones tecnológicas . . . . .	126
6.3	Objetivos . . . . .	127
6.4	Requisitos constructivos . . . . .	128
6.5	Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios:	
	Métodos aplicados con anterioridad . . . . .	129
6.5.1	El sistema experto - Lógica proposicional . . . . .	129
6.5.2	Aplicación basada en la lógica proposicional . . . . .	134
6.5.3	Sistema experto basado en redes neuronales . . . . .	138
6.5.4	Aplicación basada en redes neuronales . . . . .	138
6.5.5	Sistema experto basado en AHP . . . . .	141
6.5.6	Aplicación basada en AHP . . . . .	143
6.5.7	DSS . . . . .	145
6.5.8	La importancia de los datos para los SE . . . . .	152
6.5.9	Aplicaciones de software no experto . . . . .	154
6.6	Conclusiones . . . . .	160

## ÍNDICE GENERAL

---

<b>7</b>	<b>Edificios de alta calificación energética</b>	<b>163</b>
7.1	Análisis del problema: elementos de estudio . . . . .	164
7.1.1	Climatología . . . . .	164
7.1.2	Edificios y descripción de las tipologías arquitectónicas básicas para el estudio . . . . .	167
7.1.3	Huecos y semitransparentes . . . . .	174
7.1.4	Sistemas de climatización . . . . .	179
7.2	Construcciones de energía casi nula . . . . .	180
7.3	Certificación energética de edificios . . . . .	181
7.3.1	Oportunidades de la CE . . . . .	184
7.4	Limitaciones de los procedimientos de certificación energética . .	186
7.5	Proceso de mejora continua . . . . .	188
7.6	Normativas . . . . .	189
7.7	Conclusiones . . . . .	191
<b>8</b>	<b>Metodología</b>	<b>193</b>
8.1	Esquema metodológico . . . . .	193
8.2	Elementos de definición . . . . .	196
8.3	Reglas de Conocimiento: Cálculo de demandas de calefacción y refrigeración . . . . .	198
8.4	Modelos de demanda . . . . .	199
8.5	Consumo y emisiones . . . . .	203
8.6	Análisis económico . . . . .	207
8.7	Proceso de optimización . . . . .	210
8.7.1	Entrada de la meta-heurística tabú . . . . .	211
8.8	Proceso de resolución . . . . .	213
8.9	Calificación energética . . . . .	223
8.9.1	Cálculo del IEE . . . . .	224
8.9.2	Sistemas . . . . .	226
8.10	Conclusiones . . . . .	231



<b>9</b>	<b>Mejora en la edificación sostenible: resultados y discusión</b>	<b>233</b>
9.1	Mejora del proceso de diseño . . . . .	234
9.1.1	Caso detallado de un edificio . . . . .	239
9.1.2	48 escenarios . . . . .	248
9.1.3	La inversión . . . . .	253
9.2	Conclusiones . . . . .	255
<b>10</b>	<b>Conclusiones de interés para la tesis</b>	<b>257</b>
<b>III</b>	<b>Climatización y confort</b>	<b>261</b>
<b>11</b>	<b>Confort termal</b>	<b>263</b>
11.1	Introducción . . . . .	263
11.1.1	Argumentos para mejorar el confort termal de los edificios	264
11.1.2	La satisfacción de los usuarios . . . . .	264
11.1.3	El consumo de energía . . . . .	265
11.2	Los dos modelos o escuelas . . . . .	266
11.3	Elementos que afectan en el proceso de confort termal . . . . .	267
11.4	La ropa . . . . .	271
11.5	El comportamiento . . . . .	272
11.6	Adaptación . . . . .	273
11.6.1	Conclusiones . . . . .	277
<b>12</b>	<b>Herramientas</b>	<b>279</b>
12.1	Domótica y eficiencia energética . . . . .	281
12.2	Los edificios inteligentes . . . . .	283
12.3	Los sensores, elemento indispensable en los edificios inteligentes .	284
12.4	Índices de bienestar . . . . .	288
12.5	Escalas de sensaciones térmicas (PMV y PPD) . . . . .	292
12.6	Punto de ajuste del confort . . . . .	297
12.6.1	Introducción a los PID . . . . .	297
12.6.2	Funcionamiento . . . . .	299
12.6.3	P+I+D . . . . .	301

## ÍNDICE GENERAL

---

12.6.4	PID en los edificios energéticamente sostenibles e inteligentes . . . . .	303
12.6.5	Conclusiones . . . . .	308
<b>13</b>	<b>BSA en estudios de confort</b>	<b>309</b>
13.1	Introducción . . . . .	309
13.2	Área de superficie corporal . . . . .	312
13.3	Escalas de la sensación térmica . . . . .	314
13.4	Condiciones de estudio . . . . .	315
13.5	Resultados . . . . .	317
13.6	Conclusiones . . . . .	320
<b>14</b>	<b>Técnicas aplicadas a la mejora del confort climático</b>	<b>321</b>
14.1	Lógica Difusa . . . . .	321
14.2	Redes Neuronales . . . . .	328
14.3	Algoritmos genéticos . . . . .	332
14.4	Sistemas multi-agentes . . . . .	333
14.5	Comparativa de técnicas aplicadas . . . . .	342
14.6	Conclusiones . . . . .	345
<b>15</b>	<b>Encuestas</b>	<b>347</b>
15.1	Evaluación térmica subjetiva . . . . .	347
15.2	Otros elementos de evaluación . . . . .	351
15.3	Justificación . . . . .	354
15.4	Evaluación de la ropa . . . . .	358
15.5	La encuesta de confort online . . . . .	361
15.6	Conclusiones . . . . .	366
<b>16</b>	<b>Sensores</b>	<b>367</b>
16.1	Parámetros ambientales . . . . .	368
16.2	Termómetro de Globo . . . . .	369
16.3	Arduino, Hardware Open Source . . . . .	371
16.3.1	La plataforma Arduino . . . . .	372
16.4	La tecnología inalámbrica . . . . .	373

16.5	Sensores . . . . .	374
16.5.1	Temperatura y humedad del aire . . . . .	375
16.5.2	Luminosidad . . . . .	376
16.5.3	Calidad de aire . . . . .	377
16.5.4	Temperatura . . . . .	378
16.6	El termómetro de globo . . . . .	379
16.6.1	El sensor . . . . .	381
16.6.2	Modularidad y costes . . . . .	381
16.6.3	Experimento . . . . .	382
16.7	Mejorar futuras . . . . .	388
16.8	Conclusiones . . . . .	389
<b>17</b>	<b>La lógica difusa para la detección de configuraciones climáticas asociadas al confort</b>	<b>391</b>
17.1	Introducción . . . . .	392
17.2	Diseño del sistema basado en la lógica difusa . . . . .	393
17.2.1	Parámetro de diseño . . . . .	395
17.2.2	Variables iniciales del modelo . . . . .	395
17.2.3	Conversión de las variables a variables difusas . . . . .	396
17.2.4	Proceso de inferencia basado en reglas lógicas . . . . .	398
17.2.5	Conversión del valor de las variables difusas y toma de decisión . . . . .	398
17.2.6	Obtención de datos basada en cuestionarios subjetivos vía web . . . . .	400
17.3	Resultado . . . . .	402
17.3.1	Simulación . . . . .	402
17.3.2	Experimentación . . . . .	405
17.4	Conclusiones . . . . .	410
<b>18</b>	<b>Metodología para el análisis y toma de decisiones mediante encuestas en los edificios</b>	<b>413</b>
18.1	Metodología . . . . .	415
18.2	La arquitectura del sistema . . . . .	416
18.3	Conclusiones . . . . .	420

## ÍNDICE GENERAL

---

<b>19 Conclusiones de interés para la tesis</b>	<b>423</b>
<b>IV Conclusiones y extensiones</b>	<b>425</b>
<b>20 Conclusiones y extensiones</b>	<b>427</b>
20.1 Extensiones y líneas futuras . . . . .	429
20.2 Resultados alcanzados . . . . .	433
<b>Referencias</b>	<b>435</b>
<b>Lista de siglas y acrónimos</b>	<b>467</b>
<b>A Herramienta informática interfaz de usuario</b>	<b>473</b>
A.1 Previo al inicio . . . . .	473
A.2 Aplicación . . . . .	477
A.3 Generación de la situación inicial de partida . . . . .	478
<b>B Resumen básico de la aplicación LIDER</b>	<b>489</b>
<b>C Ejemplo salida PDF del programa SEDICAE</b>	<b>495</b>

# Índice de figuras

1.1	Esquema del documento. . . . .	8
2.1	Proceso de la inteligencia. . . . .	13
2.2	Desarrollo de una base de conocimiento [Giarratano et al., 2001]. .	18
2.3	Estructura general de un sistema experto. . . . .	23
2.4	Diferencia entre programación tradicional y SE. . . . .	25
2.5	Proceso para el estudio y creación de un SE. . . . .	28
2.6	Esquema de un SBC. . . . .	29
2.7	Procesos de los SBC. . . . .	30
3.1	Esquema de un DSS. . . . .	42
3.2	Proceso de decisión. . . . .	45
3.3	Arquitectura conceptual de un DSS [Turskis et al., 2007]. . . . .	48
4.1	Esquema de las técnicas resolutivas existentes. . . . .	52
4.2	Estructura de resolución de problemas difusos. . . . .	55
4.3	Funciones de pertenencia más comunes. . . . .	56
4.4	Ejemplo de función de pertenencia de tipo triangular. . . . .	57
4.5	Principio de la fusificación. . . . .	57
4.6	Ejemplo de operaciones básicas entre funciones de pertenencia. . .	59
4.7	Ejemplo del COG. . . . .	60
4.8	Resumen del proceso difuso. . . . .	61
4.9	Estructura de una neurona artificial frente a una neurona biológica.	63
4.10	Estructura de una neurona artificial. . . . .	66
4.11	Funciones de activación. . . . .	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

4.12	Ejemplo de función lineal. . . . .	69
4.13	Tipología de una red neuronal. . . . .	69
4.14	El perceptrón. . . . .	70
4.15	Perceptrón multicapa. . . . .	72
4.16	Técnica del gradiente descendente. . . . .	72
4.17	Propagación de la señal y del error. . . . .	73
4.18	Red de Hopfield. . . . .	75
4.19	Estructura de la red Kohonen. . . . .	76
4.20	Metaheurísticas basadas en población. . . . .	80
4.21	Metaheurísticas basadas en trayectoria. . . . .	81
4.22	Esquema algoritmo tabú. . . . .	86
4.23	Ejemplo de cruce de cromosomas. . . . .	95
4.24	Ejemplo de mutación de cromosomas. . . . .	96
4.25	Algoritmo genético [Holland, 1975]. . . . .	97
4.26	Agente [Russell y Norvig, 2010]. . . . .	101
4.27	Características de los agentes. . . . .	104
4.28	Comunicación entre agentes. . . . .	106
4.29	Protocolos de organización [van Aart, 2005]. . . . .	108
4.30	Ejemplo mediante el uso de ACL. . . . .	109
4.31	Configuraciones de interacción de agentes. . . . .	109
4.32	Índice TIOBE. . . . .	113
6.1	Consumo de energía residencial per cápita [Rydin y Austin, 2010].	120
6.2	Consumo unitario total por $m^2$ de zonas residenciales para el clima estándar del país [ENTRANZE project, 2013]. . . . .	121
6.3	Análisis del consumo energético unitario según el tipo de vivienda [Proyecto SECH-SPAHOUSEC, 2011]. . . . .	123
6.4	Ejemplo de arquitectura en un SE. . . . .	130
6.5	Arquitectura de un SE basado en la lógica proposicional. . . . .	131
6.6	Formulario de evaluación simplificado del programa BEEPS [De San- toli y Felici, 2005]. . . . .	135
6.7	Salida de la evaluación de BEEPS [De Santoli y Felici, 2005]. . .	136

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

6.8	Ejemplo de valoración del sistema BEEPS [De Santoli y Felici, 2005]. . . . .	137
6.9	Estructura lógica del modelo BEAMES [Caudana et al., 1995]. . .	139
6.10	Desarrollos incluidos en el programa de Lawrence Berkeley Lab. .	142
6.11	Metodología de la evaluación del estado [Eweda et al., 2010]. . . .	144
6.12	El proceso de priorización de los espacios dentro de un edificio [Eweda et al., 2010]. . . . .	145
6.13	Niveles de información que afectan al sistema [De Groot et al., 1999].	146
6.14	Representación de la complejidad de las decisiones en el diseño de un edificio [Hill, 1997]. . . . .	147
6.15	Relación entre criterios y usuarios [Loh et al., 2010]. . . . .	148
6.16	HOQBD [Yang et al., 2003b]. . . . .	150
6.17	Estructura principal de la base de datos DATAMINE [Loga y Dieffenbach, 2009]. . . . .	155
7.1	Mapa de severidades climáticas españolas en invierno [Maldonado, 2010]. . . . .	165
7.2	Mapa de severidades climáticas españolas en verano [Maldonado, 2010]. . . . .	166
7.3	Tipos de zonas climáticas españolas. . . . .	167
7.4	Tipologías de edificación residencial básica aplicadas. . . . .	168
7.5	Tipologías de edificación de bloques residenciales básica. . . . .	168
7.6	Orientación solar. . . . .	169
7.7	Ejemplo de efectos de la orientación en la demanda de un edificio [Druet et al., 2012]. . . . .	169
7.8	Demanda en función de la compacidad [Druet et al., 2012]. . . . .	170
7.9	Demanda en función del espesor del aislamiento [Druet et al., 2012].	171
7.10	Ejemplo de coste global y emisiones de $CO_2$ según el espesor de aislamiento. . . . .	172
7.11	Ejemplos de zonas susceptibles de aparición de puentes térmicos [Mitchell et al., 2011]. . . . .	174
7.12	Transmitancia de un acristalamiento. . . . .	175
7.13	Tipologías de acristalamiento. . . . .	176

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

7.14	Efecto solar sobre un vidrio. . . . .	176
7.15	Ejemplo de demanda de calefacción según el factor solar [Druet et al., 2012]. . . . .	177
7.16	Ejemplo de demanda de refrigeración según el factor solar [Druet et al., 2012]. . . . .	177
7.17	Ejemplos de demanda de calefacción según la transmitancia de los huecos [Druet et al., 2012]. . . . .	178
7.18	Calificación energética de un edificio terminado. . . . .	182
7.19	Flujo de cálculos del procedimiento simplificado. . . . .	184
8.1	Metodología del proceso de optimización. . . . .	195
8.2	Iteraciones del algoritmo TS. . . . .	215
8.3	CCV frente a la DC. . . . .	216
8.4	CCV frente a la DR. . . . .	218
8.5	CCV frente al consumo. . . . .	219
8.6	CCV frente al IEE. . . . .	220
8.7	CCV frente al IEE. . . . .	221
8.8	CCV frente al IEE. . . . .	222
8.9	Diferentes escalas de calificación energética [Pérez-Lombard et al., 2009]. . . . .	224
8.10	Coeficientes de reparto en viviendas unifamiliares. . . . .	225
8.11	Distribución frente a la compacidad de las demandas de calefacción de viviendas unifamiliares, situadas en Madrid [Ministerio de industria, energía y turismo, 2013]. . . . .	227
9.1	Proceso tradicional. . . . .	234
9.2	Proceso actual. . . . .	236
9.3	Ejemplos de edificios residenciales. . . . .	239
9.4	Plano de la vivienda unifamiliar. . . . .	241
9.5	Resultado del edificio inicial presentado por el programa LIDER. . . . .	242
9.6	Resultado del edificio final presentado por el programa LIDER. . . . .	245
9.7	Comparativa de sistemas. . . . .	246
9.8	Gráfico de la optimización de sistemas. . . . .	246
9.9	Optimizador. . . . .	247



## ÍNDICE DE FIGURAS

9.10	Coste del ciclo de vida (30 años) - Índice de eficiencia energética.	248
9.11	Ejemplo de iteración CCV frente a IEE. . . . .	253
9.12	Ejemplo de iteración inversión frente a IEE. . . . .	254
9.13	Ejemplo de CCV frente a IEE. . . . .	254
9.14	Ejemplo de inversión frente a IEE. . . . .	255
10.1	Esquema del proceso de investigación. . . . .	258
11.1	Edificio oficinas tipo de 5.000 $m^2$ (Asociación3E). . . . .	264
11.2	Ejemplo de emisión de calor por dos personas. . . . .	270
11.3	El cambio en la temperatura de confort respecto de la temperatura exterior [Humphreys, 1978]. . . . .	274
12.1	Distribución del consumo de energía en edificios terciarios, 2005 [IDEA, 2007]. . . . .	280
12.2	Consumo del sector terciario por sectores [IDEA, 2007]. . . . .	280
12.3	Tendencia del consumo energético (ktep) del sector residencial en España [IDEA, 2011]. . . . .	281
12.4	Tipos de Sensores. . . . .	285
12.5	Estructura de una red de sensores inalámbricos. . . . .	287
12.6	Ejemplo de sensores en una sala. . . . .	287
12.7	Metodologías para cálculo de índices de confort (AENOR) . . . .	293
12.8	Curvas de confort de Fanger. . . . .	294
12.9	Porcentaje de personas insatisfechas. . . . .	295
12.10	Áreas de bienestar en invierno y verano [ASHRAE, 1997]. . . . .	296
12.11	PID. . . . .	298
12.12	Proporcional. . . . .	300
12.13	Un controlador PID calcula su acción de control basándose en los errores de control pasados, presentes y futuros. . . . .	302
12.14	Diagrama en bloques de un control PID. . . . .	303
12.15	Esquema de un sistema HVAC con una única zona [Soyguder y Alli, 2009a]. . . . .	304
12.16	Diagrama de flujo de aplicación de un PID [Soyguder y Alli, 2009a].	306

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

12.17 Aplicación de un PID junto a la lógica difusa [Soyguder y Alli, 2009a]. . . . .	307
12.18 Resultados Energía-PMV [Calvino et al., 2004]. . . . .	308
13.1 Zona de confort. . . . .	315
13.2 Índice de masa basado en la Organización Mundial de la Salud. . .	316
13.3 Área de superficie corporal e índice de masa corporal para los sujetos de estudio. . . . .	317
13.4 Efecto de la variación de la altura. . . . .	318
13.5 Efecto de la variación del peso. . . . .	319
14.1 PID y lógica difusa [Soyguder y Alli, 2010]. . . . .	322
14.2 Función de pertenencia de entrada para $e$ y $\bar{e}$ [Soyguder y Alli, 2010].	322
14.3 Función de pertenencia de salida para $k_p$ , $k_i$ y $k_d$ [Soyguder y Alli, 2010]. . . . .	323
14.4 Reglas de control [Soyguder y Alli, 2010]. . . . .	323
14.5 Acercamiento a valores exactos de los parámetros. . . . .	324
14.6 Representación gráfica de las reglas lógicas. . . . .	326
14.7 Ejemplo de etiquetas asociadas a las variables difusas de temperatura [Rutishauser et al., 2005]. . . . .	327
14.8 Efectos de los operadores amplificar y subsumir mostrados en dos dimensiones de espacio difuso [Rutishauser et al., 2005]. . . . .	327
14.9 Comparativa de temperatura entre un sistema convencional y un sistema predictivo [Moon y Kim, 2010]. . . . .	330
14.10 Sistema de Gouda [Gouda et al., 2006]. . . . .	331
14.11 Consumos de energía respecto del PMV [Magnier y Haghighat, 2010]. . . . .	332
14.12 MAS colaborativo [Rutishauser et al., 2005]. . . . .	338
14.13 Estructura del sistema de [Wang et al., 2012]. . . . .	340
14.14 Características de los agentes. . . . .	342
15.1 Grados de percepción térmica. . . . .	349
15.2 Grado de malestar térmico. . . . .	349
15.3 Escala de preferencia. . . . .	350

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

15.4 Juicios de evaluación. . . . .	352
15.5 Encuesta online (1). . . . .	362
15.6 Encuesta online (2). . . . .	363
15.7 Registro online. . . . .	364
15.8 Encuesta diaria o estacional. . . . .	365
16.1 Sensores del sistema. . . . .	374
16.2 Conjunto de sensores y placas utilizados. . . . .	375
16.3 Sensor de temperatura y humedad. . . . .	375
16.4 Sensor de luminosidad. . . . .	376
16.5 Luminosidad en función de la resistencia. . . . .	376
16.6 Sensor de calidad del aire. . . . .	377
16.7 Estructura del sensor de calidad del aire. . . . .	378
16.8 Sensor de temperatura. . . . .	378
16.9 Resistencia frente a temperatura. . . . .	379
16.10 Esquema del circuito. . . . .	380
16.11 Esquema. . . . .	380
16.12 Termómetro de globo. . . . .	381
16.13 Termómetros de globo del experimento. . . . .	382
16.14 Temperatura del exterior de un termómetro de globo en el inicio del experimento. . . . .	383
16.15 Termómetros de globo y lugar del experimento. . . . .	384
16.16 Comparativa: GT 40mm. (150mm.) es la temperatura de un termóme- tro de globo de 40 mm. (150mm.) de diámetro, AT es la temperatu- ra del aire, PT 150mm. es la temperatura de una esfera de 150 mm. de diámetro de material aislante sólido. . . . .	385
16.17 Comparativa: GT 40mm. (150mm.) es la temperatura de un termóme- tro de globo de 40 mm. (150mm.) de diámetro, AT es la tempera- tura del aire. . . . .	386
16.18 Comparativa: GT 40mm. (150mm.) es la temperatura de un termóme- tro de globo de 40 mm. (150 mm.) de diámetro, AT es la tempera- tura del aire, $T_r$ 40mm. es la temperatura radiante de un globo de 40 mm. de diámetro. . . . .	387

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

16.19	Comparativa entre el temperatura de globo (GT) y la temperatura radiante ( $T_r$ ) con un diámetro de globo negro de 40 mm. (izquierda) y 150 mm. (derecha) . . . . .	387
16.20	Ejemplo de sensor para contabilizar personas. . . . .	388
17.1	Funciones de pertenencia del confort y la variación éste. . . . .	397
17.2	Funciones de pertenencia cuando no hay confort por calor y la variación éste. . . . .	397
17.3	Funciones de pertenencia cuando no hay confort por frío y la variación éste. . . . .	397
17.4	Funciones de pertenencia de la ocupación y la variación ésta. . . .	398
17.5	Fuerza de los centros. . . . .	399
17.6	Funciones de pertenencia. . . . .	399
17.7	Salida. . . . .	400
17.8	Cambios de configuración en un periodo invernal con ocupación baja.	403
17.9	Cambios de configuración en un periodo invernal con ocupación media-alta. . . . .	403
17.10	Cambios de configuración en un periodo invernal con ocupación media-alta. . . . .	404
17.11	Cambios de configuración en un periodo estival con ocupación media-alta. . . . .	405
17.12	Temperatura de la sala A. . . . .	406
17.13	Humedad de la sala A. . . . .	407
17.14	Respuesta perceptiva de los usuarios. . . . .	407
17.15	Evaluación afectiva de los usuarios. . . . .	408
17.16	Preferencia térmica de los usuarios. . . . .	408
17.17	Aceptabilidad personal del ambiente térmico. . . . .	408
17.18	Tolerancia personal. . . . .	409
17.19	Grado de estrés de los usuarios. . . . .	409
17.20	Estado de ánimo de los usuarios. . . . .	409
17.21	Resultado temporal del sistema de lógica difusa. . . . .	410
18.1	Metodología. . . . .	416
18.2	La arquitectura del sistema. . . . .	417

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

18.3	Primer día. . . . .	419
18.4	La figura de la izquierda muestra la curva de comodidad de Fanger [Mondelo y Universal, 1999]. La figura de la derecha muestra un posible grado de confort en un edificio. . . . .	419
A.1	Página web: <a href="http://www.codigotecnico.org">www.codigotecnico.org</a> . . . . .	474
A.2	Programas - LIDER. . . . .	474
A.3	Edificio diseñado en el programa LIDER. . . . .	474
A.4	Descripción programa LIDER. . . . .	475
A.5	Tipología de edificio en programa LIDER. . . . .	475
A.6	Sección calcular en el programa LIDER. . . . .	476
A.7	Calculando edificio en el programa LIDER. . . . .	476
A.8	Ejemplo de error de cálculo en el programa LIDER. . . . .	476
A.9	Interfaz programa SEDICAE. . . . .	477
A.10	Importar fichero de diseño al programa SEDICAE. . . . .	478
A.11	Motor de cálculo de LIDER en SEDICAE, edificio de partida. . . . .	479
A.12	Mensaje. . . . .	479
A.13	Mensaje. . . . .	479
A.14	Mensaje. . . . .	480
A.15	Mensaje. . . . .	480
A.16	Seleccionar criterio de optimización. . . . .	481
A.17	Inicio algoritmo. . . . .	481
A.18	Escritura edificio óptimo en fichero “*.cte”. . . . .	482
A.19	Cálculo del edificio y caracterización. . . . .	482
A.20	Mensaje. . . . .	482
A.21	Mensaje. . . . .	483
A.22	Gráfico. . . . .	483
A.23	Comparativa. . . . .	484
A.24	Versión II. . . . .	485
A.25	Criterio de optimización. . . . .	485
A.26	Gráfico. . . . .	486
A.27	Comparativa. . . . .	486
A.28	Sistemas. . . . .	487

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

B.1	Nuevo proyecto. . . . .	489
B.2	Descripción. . . . .	490
B.3	Gestor de la base de datos. . . . .	490
B.4	Opciones para añadir elementos a la base de datos. . . . .	491
B.5	Pantalla para importar elementos a la base de datos. . . . .	491
B.6	Crear elementos en la base de datos. . . . .	492
B.7	Crear huecos en la base de datos. . . . .	492
B.8	Apartado construcción. . . . .	493
B.9	Espacio 3D. . . . .	493
B.10	Crear planta. . . . .	494
B.11	Edificio. . . . .	494

# Índice de tablas

2.1	Aplicaciones de los sistemas expertos basados en reglas. . . . .	27
2.2	Aplicaciones que están basadas en el conocimiento. . . . .	30
2.3	Aplicaciones que están basadas en redes neuronales. . . . .	31
2.4	Aplicaciones que emplean SE difusos. . . . .	32
2.5	Aplicaciones que emplean las metodologías orientadas a objetos. .	33
2.6	Aplicaciones que emplean el RBC. . . . .	34
2.7	Aplicaciones del modelado. . . . .	34
2.8	Aplicaciones que emplean el diseño de la arquitectura del sistema.	35
2.9	Aplicaciones implementadas con los agentes inteligentes. . . . .	36
2.10	Aplicaciones que emplean la ontología. . . . .	36
2.11	Aplicaciones que especialmente ejecutan las metodologías actuales de base de datos. . . . .	37
3.1	DSS individuales. . . . .	49
3.2	DSS integrados. . . . .	49
4.1	Ejemplo de función de pertenencia en forma de tabla. . . . .	57
4.2	Paso de Inferencia. . . . .	60
4.3	Métodos de defusificación. . . . .	61
4.4	Redes neuronales frente al tratamiento convencional. . . . .	64
4.5	Tipo de perceptrones. . . . .	71
4.6	La Tecnología [Gómez Sanz, 2003]. . . . .	111
6.1	Votos de evaluación de BEEPS. . . . .	136

## ÍNDICE DE TABLAS

---

7.1	Severidad climática invierno. . . . .	165
7.2	Severidad climática verano. . . . .	166
7.3	Valores de absorptividad correspondiente a cada color. . . . .	173
7.4	Valores por defecto de los marcos, según UNE-EN ISO 10077-1:2010 [AENOR, 2010]. . . . .	178
8.1	Parámetros del edificio. . . . .	196
8.2	Variables del edificio. . . . .	197
8.3	Valores dependientes de las variables del edificio. . . . .	197
8.4	Parámetros climáticos del lugar geográfico. . . . .	198
8.5	Propiedades térmicas del aire. . . . .	198
8.6	Coeficientes de la correlación de demanda de calefacción para la zona climática B4 y diferentes tipologías de edificios. . . . .	200
8.7	Coeficientes de la correlación de demanda de refrigeración para la zona climática B4 y diferentes tipologías de edificios. . . . .	202
8.8	Tipos de energía térmica y el factor de emisiones de $CO_2$ . . . . .	205
8.9	Tipos de energía eléctrica y el factor de emisiones de $CO_2$ . . . . .	205
8.10	Tipos de combustible y el factor de paso de energía final a primaria. . . . .	206
8.11	Tipos de electricidad y el factor de paso de energía final a primaria. . . . .	206
8.12	Significado y decisión a tomar en base al VAN. . . . .	210
8.13	Límites de la escala de valores del IEE. . . . .	223
8.14	Ejemplo de datos del fabricante de un sistema de calderas. . . . .	228
8.15	Ejemplo de datos del fabricante de un sistema basado en biomasa. . . . .	229
8.16	Ejemplo de datos del fabricante de un sistema de aire acondicionado. . . . .	229
8.17	Factores de ponderación para sistemas de calefacción por bomba de calor. . . . .	230
8.18	Factores de ponderación para sistemas de refrigeración. . . . .	230
9.1	Propiedades geométricas. . . . .	242
9.2	Resultados de calefacción y refrigeración. . . . .	244
9.3	Resultados de la inversión y CCV. . . . .	245
9.4	Ejemplo de resultados en edificios residenciales en las zonas climáticas españolas. . . . .	250



## ÍNDICE DE TABLAS

---

12.1	Parámetros y factores del bienestar. . . . .	289
12.2	Índices de bienestar. . . . .	290
12.3	Parámetros principales. . . . .	295
13.1	Valores medios de las tasas metabólicas en función de la actividad desarrollada (ISO 8996). . . . .	311
13.2	Ecuaciones de BSA, donde H (cm.) es la altura y W (Kg.) es el peso del sujeto. . . . .	313
14.1	Reglas de control del PMV. . . . .	326
14.2	Modelo EDA frente a modelo BDI. . . . .	335
14.3	Reglas de los agentes. . . . .	336
14.4	Tabla resumen de los SMA aplicados. . . . .	341
14.5	Comparativa (Parte I). . . . .	343
14.6	Comparativa (Parte II). . . . .	344
15.1	Escala térmica en español. . . . .	350
15.2	Grados de malestar. . . . .	350
15.3	Grados de preferencia. . . . .	351
15.4	Tolerancia personal. . . . .	351
15.5	Calidad del aire. . . . .	352
15.6	Olor en el ambiente. . . . .	352
15.7	Calidad de la iluminación natural. . . . .	353
15.8	Calidad de la iluminación artificial. . . . .	353
15.9	Actividad personal. . . . .	353
15.10	Estado personal. . . . .	354
15.11	Estado alimenticio. . . . .	354
15.12	Comparativa (Parte I). . . . .	356
15.13	Comparativa (Parte II). . . . .	357
15.14	Valores de la resistencia térmica específica del atuendo (I). . . . .	359
15.15	Valores de la resistencia térmica específica del atuendo (II). . . . .	360
16.1	Comparativa entre WLAN, Bluetooth y ZigBee. . . . .	374
17.1	Cuestionario principal de respuestas subjetivas. . . . .	401



*El principio es la parte más importante del trabajo*

Platón

CAPITULO

# 1

## Introducción

Durante la historia de la edificación tanto ingenieros como arquitectos han pretendido conseguir un entorno controlado en el cual poder desarrollar su actividad diaria con la mayor calidad posible.

Los arquitectos no sólo tienen que preocuparse de hacer una obra estética y funcional, en la actualidad es indispensable que las nuevas construcciones sean amigables con el medio ambiente, especialmente teniendo en consideración que éstas estarán en pie posiblemente mucho más tiempo que nosotros. En consecuencia, la antigua naturaleza estática que conformaba las estructuras de los edificios está cambiando a un desarrollo en el que se ha dado prioridad al diseño y organización de edificios, desarrollando técnicas y estrategias que permiten minimizar los costes de explotación, además de la optimización en el ahorro de energía.

El creciente desarrollo de las tecnologías de la información ha permitido que la industria de la edificación desarrolle sistemas con los cuales controlar las variables ambientales en las distintas partes de un edificio, tanto desde la perspectiva del confort humano como de los aspectos energéticos y ambientales. Estas técnicas pueden ser aplicadas en los edificios desde sus fases de diseño y desarrollo (mediante auditorías de eficiencia energética) hasta en el mantenimiento y actividad diaria.

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Tanto para el desarrollo de las nuevas construcciones, como para la mejora o rehabilitación de las antiguas, es necesario dominar todo el conocimiento existente y la experiencia que permita mejorar la eficiencia energética de los edificios. La finalidad de esta tesis es la elaboración de algoritmos personalizados que permitan dicha mejora en línea con el objetivo de la Unión Europea para 2020 y sus compromisos de: recortar las emisiones de  $CO_2$  en un 20 %, mejorar la eficiencia energética en otro 20 % y que el 20 % de la energía que se consuma proceda de fuentes renovables.

### 1.1 Motivación

El objetivo es estudiar, analizar y desarrollar de manera clara y sencilla, desde el punto de vista de la ingeniería y de la arquitectura técnica, como las heurísticas pueden ayudar en la toma de decisiones que afecta a la eficiencia energética de forma equilibrada en sus dimensiones social, económica y ambiental.

Estas técnicas, permite mejorar el tiempo de resolución de problemas, por lo que se quiere demostrar que su desarrollo y aplicación afecta tanto en el tiempo necesario para comprender y aplicar el proceso de certificación y auditoria energética de edificaciones, como en la aplicación y estudio del confort de los usuarios de los sistemas de calefacción, de ventilación y aire acondicionado.

Con este propósito se han realizado para su demostración y entendimiento, diversos ejemplos de certificación en fase de diseño del edificio, junto a una explicación de las auditorias que realizan y desarrollan los arquitectos para la certificación energética de los edificios. El propósito es generar una herramienta que ayude en la toma de decisiones, permitiendo el uso e inserción de medidas de mejora de los elementos y sistemas que conforman la estructura del edificio.

El estudio motiva la revisión de la tecnología y herramientas existentes para la realización y desarrollo de casos prácticos sobre edificaciones reales, la adquisición del conocimiento necesario y mejorar los procedimientos actuales. La presente investigación permitirá a los ingenieros de edificación, desarrollar su profesión realizando las funciones de revisor, gestor de la implantación y analizador de la viabilidad de la solución aportada por el sistema. Las funciones del sistema son

analizar las posibles estructuras y sistemas energéticos eficientes en edificios, desde el punto de vista técnico, económico, ambiental e incluso ético, si se piensa en el efecto que el consumo energético tendrá en las futuras generaciones.

El desarrollo de esta herramienta, ha motivado el análisis del procedimiento utilizado en España para la evaluación de la eficiencia energética de edificios, centrándonos en los procedimientos necesarios para conseguir evaluar un edificio, para ello se ha trabajado con los programas informáticos validados por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio para el cumplimiento de los requisitos del Código Técnico de la Edificación.

Pese a la optimización del diseño de un edificio, durante su vida útil, este se ve expuesto a una demanda, debida a las necesidades de confort de sus usuarios, a la mayor o menor pérdida de calor durante el invierno, la capacidad de retener este durante la primavera y el otoño, a la ganancia de calor durante el verano, y que dependen de la zona climática. En verano, se plantea pues la necesidad de reducir el exceso de humedad relativa para alcanzar la zona de confort durante la mayor parte del tiempo. Por tanto, debemos tener presente que podemos incorporar sistemas que mejoren las condiciones interiores de los edificios mediante el aporte o pérdida controlada del calor o el frío. Estas necesidades interiores de los edificios, motivan el desarrollo, análisis y validación de un modelo para el control del ambiente interior de un edificio considerando el confort térmico de sus ocupantes.

Actualmente el confort de las personas está implícito en el diseño, del cual se determinan los factores y variables que se requieren controlar, para lo cual se realizan estudios aplicándose modelos de índices desarrollados para cumplir con este objetivo. Este estudio pretende demostrar que mediante un sistema experto, se puede ahorrar energía y mejorar o mantener el confort dinámicamente, sin aplicar los índices de confort actuales. El objetivo principal es el desarrollo de un modelo de comportamiento y control de un equipo de climatización al cual se le incorpora el concepto de confort térmico, con el que se pretende mantener el mismo dentro de un rango aceptable para la mayoría de los ocupantes. Para lograr este objetivo se ha realizado un análisis de las diferentes heurísticas y se ha propuesto una metodología de control.

## **1. INTRODUCCIÓN**

---

### **1.2 Objetivos**

El objetivo fundamental de esta tesis es contribuir a la eficiencia en el sector de la construcción mediante la aplicación de sistemas expertos. Este objetivo central se desglosa en varios sub-objetivos que identifican las líneas de trabajo de esta tesis:

- Caracterización y análisis del proceso de diseño actual de los edificios para la mejora de la eficiencia y calificación energética, y validación del sistema.
- Caracterización y análisis del confort en los edificios.
- Estudio de la literatura científica existente para el desarrollo de sistemas expertos y algoritmos.
- Estudio de la literatura científica en el diseño de edificios.
- Estudio de la literatura científica en el estudio de confort de los edificios.
- Diseño de una metodología y sistema experto para mejorar la calificación energética de los edificios en España.
- Desarrollo de un sistema que permita analizar y estudiar el confort en los edificios.
- Diseño de un dispositivo de hardware libre que permita, mediante sensores, analizar en tiempo real el estado y confort de los ocupantes de los edificios.
- Desarrollo de una metodología y simulación de algoritmos de decisión para el confort en edificios.

### **1.3 Estructura**

Expresadas las motivaciones de la tesis y los objetivos de la misma. Se presenta la estructura del documento, que se divide en tres grandes bloques.

### **Bloque I**

El primer bloque, se centra en un estado del arte de las técnicas aplicables a los problemas de edificación, desde el desarrollo de sistemas expertos que ayuden a la toma de decisiones hasta el uso de técnicas de resolución, e implementación y uso de heurísticas.

- El capítulo 2, desarrolla e introduce el concepto de sistema experto: su estructura, problemáticas y características, junto con unas breves nociones de las metodologías que engloba y sus aplicaciones.
- El capítulo 3, define y presenta los sistemas de ayuda a la toma de decisiones.
- El capítulo 4, presenta las técnicas de resolución existentes y susceptibles de ser aplicadas en el desarrollo de los modelos.
- El capítulo 5 presenta algunas conclusiones de interés para el desarrollo de la tesis.

### **Bloque II**

El segundo bloque, se enfoca al diseño edificatorio sostenible, que asegura la calidad ambiental y la eficiencia energética de un edificio durante todo su ciclo de vida, materializando de forma equilibrada sus dimensiones social, económica y ambiental. El objetivo de este bloque es establecer una metodología de optimización de la envolvente o epidermis de un edificio y de los elementos activos que la conforman, para estudiar el consumo energético y el ahorro correspondiente, considerando el impacto medioambiental y el coste de éste. La aplicación de heurísticas permite agilizar el tiempo de resolución de los problemas de diseño para la obtención de una calificación energética.

- El capítulo 6, presenta e introduce el problema, las motivaciones y objetivos a estudiar y el estado del arte de los métodos y software aplicados con anterioridad.

## 1. INTRODUCCIÓN

---

- En el capítulo 7, se analizan los elementos que afectan al problema de estudio, y se presentan conceptos como edificios de energía casi nula o certificación energética, y se presentan las normativas actuales.
- El capítulo 8, presenta la metodología desarrollada.
- El capítulo 9, presenta los resultados de la aplicación de esta metodología.
- El capítulo 10, presenta algunas conclusiones de interés para el desarrollo de la tesis.

### **Bloque III**

El tercer bloque, muestra un acercamiento a la adaptación de la tecnología a una nueva generación de sistemas de climatización basados en el confort adaptativo. Frecuentemente, los sistemas de climatización de los edificios disponen de un sistema de control, pero la información operativa de dicho sistema de control para modificar sus condiciones de operación es muy limitada. Asimismo sucede que el dispositivo de control sigue una ley de modificación que es estándar y que, por tanto, no ha sido comprobada ni verificada en dicho edificio. En consecuencia es frecuente que el grado de satisfacción de los usuarios de un edificio respecto de las condiciones de confort térmico y de calidad del aire interior del mismo sea bajo. En este bloque se propone el desarrollo de un modelo de bienestar basado en la caracterización térmica de los ocupantes, así como en sus factores psicológicos y de comportamiento. El objetivo es conseguir una ley de control del sistema de climatización que permita un alto grado de confort interior de los edificios y minimice el consumo de energía. Esta ley se parametrizará de tal forma que podrá particularizarse para cualquier edificio, una vez sometido el mismo a un periodo inicial de funcionamiento durante el cual los ocupantes del mismo proporcionasen información sobre su nivel de bienestar.

- El capítulo 11, presenta los argumentos de estudio del confort termal, junto con los elementos que influyen en el confort o varían la adaptación de los ocupantes al clima.



- El capítulo 12, presenta las herramientas aplicadas al confort, desde la domótica en los edificios inteligentes, hasta los índices de bienestar existentes u otras herramientas.
- En el capítulo 13, se presenta un estudio del área de superficie del cuerpo, sus efectos y cual deben ser los sujetos de estudio preferibles en una investigación.
- El capítulo 14, presenta un conjunto de técnicas de estudio aplicadas en los sistemas de climatización, ya introducidas en el bloque I.
- El capítulo 15, presenta las encuestas de evaluación subjetiva, como elemento fundamental de la metodología presentada en el Bloque III.
- El capítulo 16, presenta un conjunto de sensores de Hardware libre, para su uso en la metodología desarrollada. Además, se desarrolla una breve investigación de los termómetros de globo, y se presentan las pautas para la fabricación libre de termómetros de globo, mejorándose el coste y viabilidad para realizar investigaciones en tiempo real.
- El capítulo 17, presenta un sistema de lógica difusa para la detección de configuraciones climáticas asociadas al confort.
- El capítulo 18, presenta la metodología para el análisis y toma de decisiones mediante encuestas en los edificios.
- El capítulo 19, presenta algunas conclusiones de interés para el desarrollo de la tesis.

### **Conclusiones y extensiones**

Por último se exponen las conclusiones alcanzadas en la tesis, las aportaciones más relevantes de la misma y las futuras líneas de investigación. Además, se enumeran las publicaciones realizadas. Para concluir, en cada bloque del documento se presentan también las conclusiones y resultados de investigación.

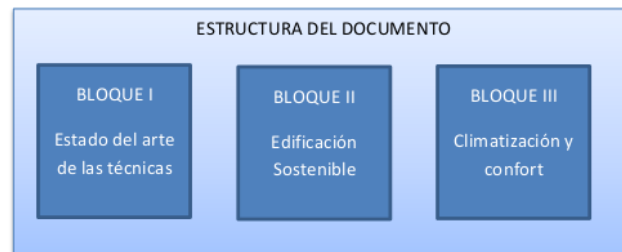
## 1. INTRODUCCIÓN

---

### Anexos

Al final del documento, junto a las referencias, se presentan tres anexos:

- El Anexo A presenta la herramienta informática desarrollada a partir de la metodología del bloque II.
- El Anexo B, presenta un resumen básico de la aplicación LIDER.
- El Anexo C, presenta una salida en PDF tras la aplicación de la herramienta mostrada en el anexo A.



**Figura 1.1:** Esquema del documento.

# **Bloque I**

## **Estado del arte**



*Se tendrá la inestimable ocasión de ver allí ... los desarrollos más avanzados, el estado del arte de nuestra tecnología*

R.A.E.

CAPITULO

# 2

## **Sistemas expertos y metodologías**

### **2.1 Introducción**

En este capítulo se presentan algunos conceptos básicos asociados a la inteligencia artificial y, más en concreto, a los sistemas expertos. Posteriormente se hace un estudio sobre las heurísticas aplicables a problemas de ingeniería, algunas de las cuales serán aplicadas en los siguientes bloques de esta tesis.

Es indudable que los ordenadores han revolucionado el sector de la construcción, las técnicas de análisis han mejorado, y hoy en día es posible simular el comportamiento de sistemas y modelos muy complejos, e incluso llegar a optimizarlos. Actualmente, existen técnicas que permiten asistir por ordenador, desde un usuario que diseña un edificio, hasta un sistema de climatización que administre éste. La tecnología, no solo aporta una reducción en el tiempo de los procesos o trabajos, sino también la capacidad de optimizar las soluciones a los problemas. Los ordenadores se convierten en sustitutos de los expertos humanos que anteriormente resolvían estos problemas.

## 2. SISTEMAS EXPERTOS Y METODOLOGÍAS

---

### 2.2 Sistema experto

Las raíces de los sistemas expertos abarcan muchas disciplinas. En particular, una de las raíces principales de los sistemas expertos es el área del procesamiento de la información en la mente humana, denominada ciencia cognitiva o el estudio del modo en que los humanos procesan la información. La cognición es el estudio de la manera en que las personas piensan, especialmente cuando resuelven problemas. En este sentido, la psicología cognitiva y los sistemas expertos solapan su interés conceptual ya que ambas estudian las técnicas de deducción del conocimiento con todos los problemas que ello supone. La diferencia entre ellas radica en que los sistemas expertos incluyen sistemas computacionales independientemente de que logren procesos parecidos a los humanos o no [Zacagnini y Adarraga, 1988]. Por tanto, el estudio de la cognición es muy importante para el desarrollo de los sistemas expertos.

#### 2.2.1 Visión general

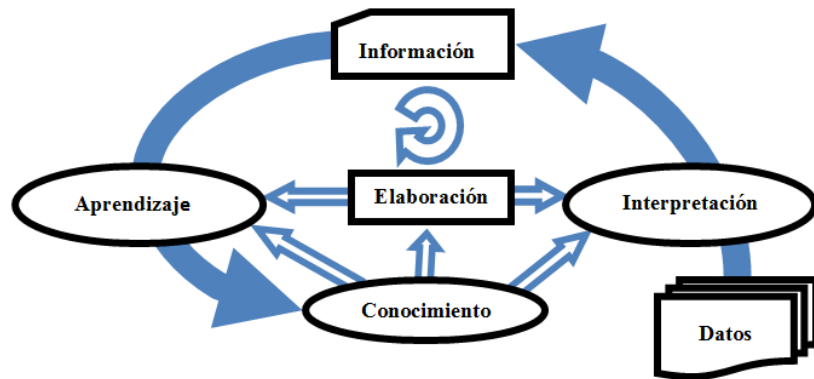
Los *Sistemas Expertos* (SE) son una rama de la *Inteligencia Artificial* (IA) aplicada. En sus inicios los SE se desarrollaron por la comunidad de investigadores de la IA en la década de 1960.

El término inteligente incluye muchos aspectos (pensar, razonar, comprender, adquirir conocimiento y recordar) que conforman el proceso de la inteligencia (figura 2.1), pero en el contexto de los SE se enfatiza un aspecto específico del comportamiento inteligente: razonar.

Este aspecto se aplica a esta área del conocimiento mediante el uso de heurísticas para resolver problemas de forma eficiente. Por otro lado, una resolución inteligente usa conocimiento a priori para reducir el espacio de búsqueda de la solución, utilizando algunos indicios que pueden guiar a la obtención de una solución aceptable.

En el área de las ciencias, como en cualquier otra área de conocimiento, el principio para la resolución de un problema se basa en la correcta definición de la tarea o dominio en la que surge el problema que debe ser resuelto.

En la actualidad, no se encuentran soluciones generales para los problemas clásicos en esta área de conocimiento, sin embargo, la restricción del dominio del



**Figura 2.1:** Proceso de la inteligencia.

problema ayuda a encontrar una solución útil. Un SE se basa en codificar la experiencia de un humano sobre un conocimiento específico de una tarea. Por tanto, el conocimiento se almacena en el ordenador (el experto) y los usuarios hacen peticiones al equipo para obtener el consejo específico que sea necesario.

Se pueden definir los SE como una “clase de programas” que son capaces de manejar problemas que normalmente requieren para su resolución de la intervención humana especializada [Martinez y Britos, 2004]. Existen en la actualidad muchas definiciones de sistema experto, algunas de las más significativas son:

- Los sistemas expertos son “un programa de computación inteligente que usa el conocimiento y los procedimientos de inferencia para resolver problemas que son lo suficientemente difíciles como para requerir significativa pericia humana para su solución” [Feigenbaum, 1982].
- Un sistema experto es “un sistema de software, o software combinado con hardware, capaz de ejecutar competentemente una tarea específica realizada generalmente por un experto humano” [Bowerman y Glover, 1989].
- Los sistemas expertos son “una rama de la IA que hace un amplio uso del conocimiento especializado para resolver problemas como un especialista humano” [Giarratano et al., 2001].

## 2. SISTEMAS EXPERTOS Y METODOLOGÍAS

---

- Según [Darlington, 2000]: “Un sistema experto es un programa que trata de imitar la experiencia humana mediante la aplicación de métodos de inferencia de un cuerpo específico de conocimiento”.
- Según [Turban y Aronson, 2001b]: “Un sistema experto es un sistema que emplea el conocimiento humano capturado en una computadora para resolver los problemas que normalmente requieren experiencia humana”.
- El SE es un equipo con la capacidad de hacer inferencias y llegar a una conclusión específica. Se comporta como un consultor humano, que da consejos y explica, si es necesario, la lógica que existe detrás de estos consejos [Turban y Aronson, 2001b].
- Una definición clásica de un grupo especialista en sistemas expertos de la sociedad británica de computadores, lo define como: “... la incorporación en un ordenador de un componente basado en el conocimiento, que se obtiene a partir de la pericia de un experto, de tal forma que el sistema pueda ofrecer asesoramiento inteligente o tomar una decisión inteligente sobre una función del proceso” [Naylor, 1987].

El dominio de un SE denota el área del problema del que se tiene conocimiento. Éste está compuesto por una colección de conocimientos representativos, hechos, procedimientos, reglas, algoritmos y datos. Los sistemas expertos, por lo general, son diseñados para resolver problemas de un dominio limitado y concreto. Aunque generalmente, los problemas para los que se diseñan no se pueden reducir (o son irreducibles) a procedimientos seguros, ya que exigen de la toma de decisiones en condiciones de información insuficiente o imprecisa.

Se utiliza el término sistemas expertos porque estos emulan el comportamiento de un experto en un dominio concreto y en ocasiones son usados por los propios expertos para facilitar su trabajo, con la idea de mejorar la calidad y rapidez en las respuestas, lo que se traduce en una mejora de la productividad del experto. En otras palabras, un SE es uno de los medios más potentes y flexibles para obtener soluciones a una variedad de problemas que a menudo no pueden ser tratados por métodos más tradicionales. Ésta es la razón de que su uso esté proliferando en muchos sectores, donde sus aplicaciones están demostrando ser críticas en el proceso



de apoyo a la toma de decisiones y resolución de problemas. Otra razón es la mejora que produce en la labor profesional en la que éste es utilizado, según [Feigenbaum et al., 1988], un sistema experto tiende a una ganancia económica con un orden de magnitud de 10 o más veces.

Por supuesto, los SE tienen una serie de ventajas e inconvenientes derivados de su uso. Entre las ventajas, cabe destacar que el sistema experto y la experiencia artificial que éste genera es una fuente de experiencia permanente y consistente, que siempre está disponible sin generar un coste adicional, y por último es fácil de transferir y documentar. De igual manera, se pueden encontrar desventajas frente a la experiencia humana, destacándose la pérdida de creatividad que supone la adaptación a los problemas ante cambios, el uso de un enfoque específico del problema frente al enfoque amplio que aporta el experto humano y la desestimación del sentido común frente al sentido técnico [Durkin, 1990].

### 2.2.2 Visión conceptual

El sistema experto es frente a las resoluciones generalistas de un problema, un sistema especialista basado en el dominio del conocimiento. El dominio del problema concentra soluciones de un espacio de conocimiento, sin embargo, el nivel del dominio de conocimiento podrá ser más amplio si está desarrollado para ello. El tamaño del dominio de conocimiento está relacionado con la capacidad de hacer inferencias o razonar de un sistema. Es decir, de la capacidad de desarrollar conclusiones, dado un conjunto de hechos.

Conceptualmente, estos sistemas tienen un conjunto de ventajas muy atractivas, según [Giarratano et al., 2001]:

- La mayor disponibilidad: El sistema experto es la producción masiva de la experiencia, o la reproducción masiva del especialista.
- Coste reducido: El coste de poner la experiencia a disposición del usuario se reduce enormemente.
- Peligro reducido: En algunos ambientes, el uso de sistemas expertos reduce el peligro sobre las vidas humanas.

## 2. SISTEMAS EXPERTOS Y METODOLOGÍAS

---

- **Permanencia:** La experiencia es permanente, el conocimiento del sistema perdura en el tiempo.
- **La experiencia múltiple:** El sistema experto puede almacenar el conocimiento o la experiencia de varios expertos [Harmon y King, 1985]. La combinación de expertos frente a un único experto humano, supone la consolidación de varios conocimientos de diferentes expertos y da lugar a sistemas expertos más fiables.
- **Mayor confiabilidad:** Si el sistema está bien desarrollado su fiabilidad superará a los errores humanos. Al proporcionar una segunda opinión los sistemas expertos incrementan la confianza en un especialista que ha tomado la decisión correcta.
- **Explicación:** El sistema puede ser didáctico y prestar un diagnóstico del problema y de su resolución, lo cual aumenta la confianza.
- **Respuesta rápida:** En determinadas situaciones es necesaria una respuesta más rápida al tiempo necesario por un humano para su resolución, como ocurre en los casos de sistemas de urgencia.
- **Respuestas completas y sin emociones:** Las respuestas de sistema no se ven afectadas por los límites humanos emocionales o intelectuales, como ocurre ante la presión o la fatiga humana.
- **Tutoría inteligente:** El sistema permite desarrollar el aprendizaje de cualidades de un experto humano, personal con poca experiencia, puede resolver problemas que requieran un conocimiento experto.
- **Base de datos inteligente:** El sistema puede almacenar el conocimiento de reglas aprendidas tras su uso.

Los beneficios de un sistema experto mejoran el desarrollo de los procesos, debido a que estos contienen la información de los diversos expertos de forma clara y estructurada, al existir el conocimiento del experto de manera explícita en nuestro sistema. Esto permite re-alimentar el conocimiento, ajustarlo y re-examinarlo desde la regla más simple. Al igual que el conocimiento se almacena en libros,

revistas u otros documentos, éste y los razonamientos para alcanzarlos pueden ser almacenados en reglas u otras bases de conocimiento.

Un ejemplo de regla, “SI hace frío ENTONCES enciende calefacción”, si existe el hecho de que hace frío, esto concuerda con el patrón “hace frío”, la regla se satisface y se ejecuta la acción de encendido del sistema de calefacción, “enciende calefacción”. Por supuesto, el componente hace frío es un elemento exacto o inexacto en el sistema, y su exactitud dependerá del prisma de trabajo elegido por el experto.

La resolución de los problemas expertos, se puede basar en dos tipos de razonamiento: exacto e inexacto. El razonamiento exacto constituye una base de conocimiento en la cual la resolución de reglas no genera ninguna problemática (“hace frío” si la temperatura es menor de  $18^{\circ}\text{C}$ ), sin embargo, si se pueden producir incompatibilidades que deben ser resueltas por el sistema o por el usuario. El razonamiento inexacto (“hace frío” con una probabilidad del 60 %), se produce por la realización de razonamientos basados en condiciones de incertidumbre, su resolución se solía tratar mediante los paradigmas de razonamiento probabilístico y teorema de Bayes, en la actualidad existen otras metodologías como la aplicación de la lógica difusa. Mediante la teoría de la probabilidad se pretende reproducir las incertidumbres generadas por razonamientos inexactos de parte o todas las reglas de conocimiento, donde la inexactitud se puede producir en el antecedente de la regla, en la conclusión o en el propio significado que se le asigna a ésta.

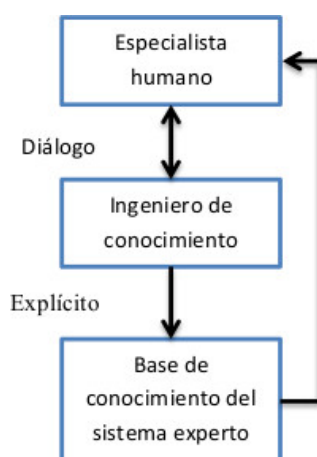
En ambos tipos de razonamiento, exacto e inexacto, la verificación de las reglas, eliminación de incompatibilidades y resolución de conflictos son el objetivo de trabajo del ingeniero de conocimiento, dado que la corrección de los hechos de una regla no significa que el sistema proporcione una respuesta correcta, pues la inferencia de las reglas puede ser incorrecta y necesitar de un proceso de validación que minimice la incertidumbre. Haciendo una analogía para la edificación, la verificación respondería a la pregunta sobre la apropiada construcción de un edificio en cuanto a materiales y metodología de construcción se refiere, sin embargo, la validación cuestionaría la respuesta energética o económica del edificio verificado.

El sistema experto clásico abarcaba el conocimiento mediante la entrevista con el ingeniero de conocimiento, por esta razón al proceso de construir un sistema

## 2. SISTEMAS EXPERTOS Y METODOLOGÍAS

---

experto se le denomina ingeniería del conocimiento [Michie, 1973]. En la actualidad, consiste en la adquisición y codificación del conocimiento a partir de un especialista humano o de otras fuentes, ya sean bases de datos, formularios a usuarios, experiencia del sistema mediante la inducción de ejemplos, etc. Pese a ello, el sistema y el especialista mantienen una relación durante el desarrollo del sistema, realizando ciclos de mejora continua del sistema hasta que el funcionamiento de este es satisfactorio. No es trivial dar forma de reglas al conocimiento de los especialistas, sobre todo cuando nunca se ha explorado sistemáticamente el área de conocimiento, las duplicidades de información, las inconsistencias, ambigüedades u otras dificultades. La figura 2.2 representa la relación de trabajo que debe existir entre el experto, el ingeniero de conocimiento y el sistema.



**Figura 2.2:** Desarrollo de una base de conocimiento [Giarratano et al., 2001].

### 2.2.3 Diseño de sistemas expertos

El diseño de un sistema consiste en la evaluación de las alternativas y la especificación de una solución detallada. El diseño especifica como logrará el sistema los objetivos para los cuales se ha creado. Conocido el problema a resolver se debe analizar y evaluar las soluciones dentro del área de conocimiento respectivo. Para el diseño del sistema, debe ser considerado el equipo de trabajo, como se indicó en la figura 2.2, se consideran los siguientes elementos que interactúan en el diseño y desarrollo [Tripathi, 2011]:

- El experto: Aporta su conocimiento especializado.
- El ingeniero de conocimiento: Encargado de realizar las preguntas al experto, estructurar el conocimiento, explicitar e implementar la base de conocimientos.
- El usuario: Debe indicar y aporta sus necesidades e ideas respecto al sistema experto.

El proceso de diseño de un sistema experto puede tener errores en sus diferentes pasos del diseño:

- Experto o especialista: En esta parte del proceso se pueden producir errores de conocimiento por incorrecciones e incompletitudes.
- Ingeniería del conocimiento: Pueden surgir errores de carácter semántico, entre el especialista y el ingeniero de conocimiento, produciéndose incompletitud del conocimiento que proviene del especialista.
- Base de conocimiento: Errores en las estructuras sintácticas o errores en el contenido debido a un conocimiento incorrecto, incompleto y a la existencia de incertidumbre en las reglas o los hechos.
- Mecanismos de inferencia: Errores en el mecanismo o software.
- Resolución: Errores producidos por errores de prioridad, interacción y conocimiento en las reglas.

### 2.2.4 Desarrollo de un sistema experto

Las etapas de desarrollo de un sistema experto [Giarratano y Riley, 2004]:

- Definición del problema: En la fase de proyecto se determina y delimita estrechamente el ámbito de trabajo. En esta fase, el ingeniero de conocimiento y el experto trabajan para concretar el problema que debe ser resuelto por el sistema.

## 2. SISTEMAS EXPERTOS Y METODOLOGÍAS

---

- **Adquisición del conocimiento:** Delimitado el dominio, el conocimiento del sistema se debe ampliar con los conocimientos del experto. En esta fase debe verificarse la correcta y conveniente transmisión del conocimiento. El ingeniero del conocimiento es responsable de la implementación de éste, aunque es el especialista el responsable de la exactitud del conocimiento.
- **Desarrollo de prototipos:** Depende de la precisión de los requisitos del proyecto. La adecuada realización de esta posibilita la reducción de modificaciones en el desarrollo del proyecto.
- **Integración, verificación y pruebas:** Definido y estructurado el SE se procede a la integración de la partes del sistema y el conocimiento, se comprueba el funcionamiento por el experto, el ingeniero del conocimiento y los usuarios. Mediante el desarrollo de pruebas que ayudan a realizar ciclos de mejora del sistema en su proceso de depuración hacia el final del sistema.

### 2.2.5 Problemáticas y características

Los SE son sistemas de conocimiento delimitado, algunos de ellos con capacidad de auto aprendizaje, lo cual genera una problemática cuando se alcanzan los **límites de la ignorancia**. Estos límites se logran cuando se rompen las reglas del diseño o se alcanza límites de incertidumbre para los que el sistema no está diseñado, por falta de precisión o completitud. Ante esta problemática, según [Giarratano et al., 2001] producida por la carencia de conocimiento casual, se puede caracterizar los sistemas en:

- **Conocimiento superficial:** Basado en el conocimiento empírico y heurístico.
- **Conocimiento profundo:** Basado en estructuras básicas, funciones y comportamientos de las reglas y objetos.

Por supuesto, es más fácil generar un sistema que aplique acciones sobre un sistema de climatización en base a unos límites de temperatura en un espacio de trabajo. Que realizar un sistema que tenga en cuenta el conocimiento psicológico, anatómico, económico y energético de un entorno para la elección de la temperatura y su alcance mediante un sistema de climatización.

Otra de las problemáticas de los sistemas actuales es la limitación de estos a la hora de buscar **analogías** que permitan generalizar el conocimiento. El uso del conocimiento casual, permite obtener conocimiento de la experiencia, sin embargo, el coste de una solución exacta, tiene a su vez, un coste de recursos que no son permitidos para los usos y necesidades de los sistemas, por esta razón las heurísticas proporcionan solución a estos problemas. Aunque, en ocasiones surge la necesidad de encontrar sistemas que mejoren la búsqueda de una solución por analogías entre problemas.

El proceso de desarrollo anteriormente mostrado, suele tener otra problemática debida al fuerte proceso de transmisión del conocimiento y dependencia del experto. Este problema o cuello de botella de la adquisición de conocimiento suele restringir la construcción de los SE. Por su elevado coste y tiempo de desarrollo, y la dificultad de mantenimiento del sistema.

A pesar de estos problemas, los SE gozan de un conjunto de características que suelen compensar estas problemáticas. Los SE se diseñan para alcanzar un nivel de competencias igual o superior al del especialista del área, por lo que la calidad de respuesta es muy alta. El tiempo de respuesta es inferior al del especialista y su respuesta es fiable y comprensible. Estas características aportan un enorme potencial frente a los problemas que surgen de su desarrollo.

Para desarrollar estas características, los sistemas más complejos son capaces de: enumerar las razones a favor y en contra de una hipótesis particular, enumerar las hipótesis que puedan explicar la evidencia observada, explicar las consecuencias, dar un pronóstico o predicción, justificar las preguntas que se realizan al usuario y justificar la solución con el conocimiento del problema. Por supuesto, estas características dependerán del dominio del problema. Para ello, antes de realizar un SE se debe responder a un conjunto de preguntas:

**¿Es solucionable eficazmente el problema con un programa convencional?**

La respuesta afirmativa, supondría el rechazo a la aplicación de un SE ya que existe una solución eficiente.

**¿Está bien delimitado el dominio?** La complejidad del sistema experto es proporcional a la cantidad de conocimiento que requiera el SE.

**¿Hay la necesidad y el deseo de tener un sistema experto?** Como se indicó con anterioridad, la creación de un sistema experto supone un gran consumo

## 2. SISTEMAS EXPERTOS Y METODOLOGÍAS

---

de recursos para su desarrollo, tanto por especialistas como ingenieros, por lo cual no tendría sentido la realización de un sistema experto sobre el que no exista disposición para ser utilizado.

**¿Hay al menos un especialista que esté dispuesto a cooperar?** Es necesario para el desarrollo que exista al menos un experto que quiera cooperar, pero a la vez debe de tenerse en cuenta que del número de especialistas que cooperen dependerán las distintas soluciones, métodos o puntos de vista que tenga en cuenta el sistema. Tratar de codificar varios métodos para resolver problemas en una sola base de conocimiento puede crear conflictos internos e incompatibles.

**¿Puede el experto explicar el conocimiento en forma comprensible al ingeniero del conocimiento?** La dificultad para hacer explícito el conocimiento para un sistema, hace necesario que el equipo de trabajo (especialistas e ingenieros de conocimiento) esté preparado para la tarea.

**¿El conocimiento para resolver el problema es principalmente heurístico e incierto?** Los sistemas expertos son apropiados cuando el conocimiento del especialista es muy heurístico e incierto. Si el problema puede resolverse únicamente con la lógica y los algoritmos, la resolución debe realizarse con un programa convencional.

### 2.2.6 Estructura general de un sistema experto

Al igual que los humanos se especializan en áreas de trabajo y de conocimiento, los sistemas deben ser expertos en la resolución de dominios restringidos de un problema. Aunque al igual que ocurre en nuestra sociedad, la fuerza de grupo y la actividad colaborativa de nuestros sistemas será la fuente de conocimiento que resolverá los grandes problemas, al igual que la evolución de los seres humanos, los sistemas expertos evolucionan hasta alcanzar o emular la inteligencia y razonamientos humanos.

El término emular implica que nuestros sistemas expertos tienen como objetivo actuar en todos los aspectos como un especialista humano, esta emulación requiere que el sistema actúe como en la realidad.

La pericia, la experiencia o el conocimiento de estos sistemas dependerán del aprendizaje y los aportes que los expertos humanos sean capaces de transferir a



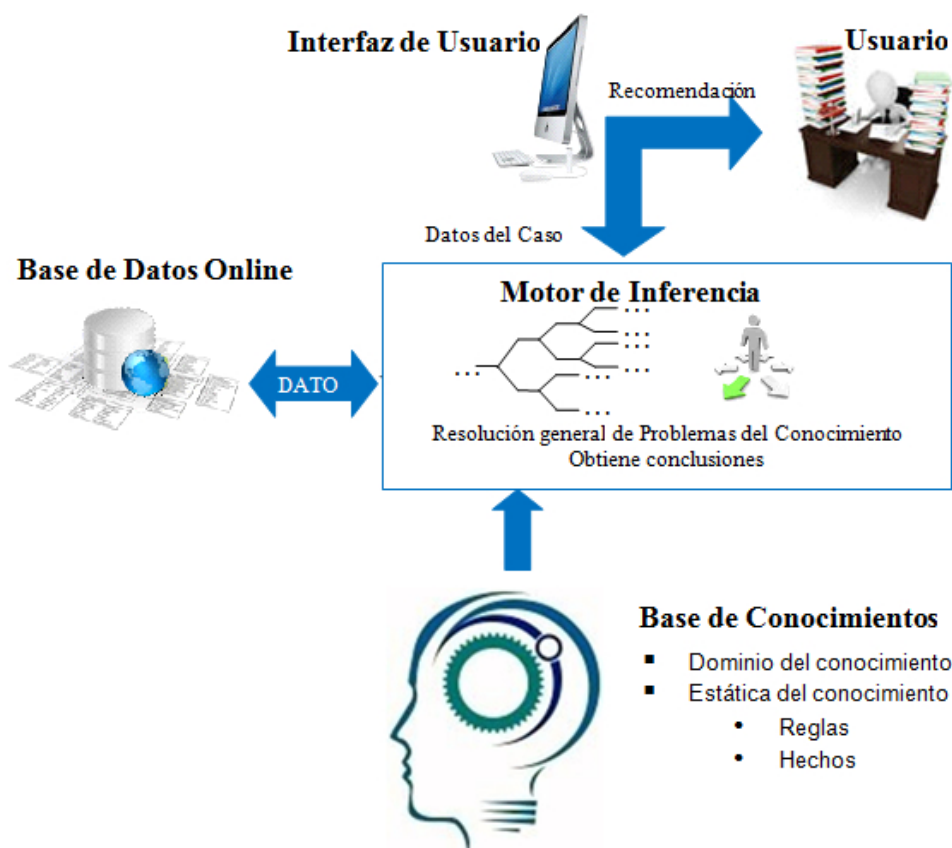
## 2.2 Sistema experto

estos sistemas. Pues sin la experiencia desarrollada por los expertos en éstas áreas, los sistemas reducirían su capacidad de acción.

La figura del especialista, debe ser destacada, ya que este tiene un conocimiento o habilidades especiales de resolución que la mayoría no conoce, por supuesto, siempre que éste sea capaz de transmitir dicho conocimiento.

Para un sistema experto, el usuario debe de aportar los hechos u información del sistema para recibir el consejo, experiencia o resolución de un problema.

Para ello, el sistema experto debe de estar conformado por dos elementos esenciales: una base de conocimiento, ya sean datos, reglas, ejemplos de resolución, y un mecanismo de inferencia que le permita sacar conclusiones. En la literatura no existe una estructura de sistema experto común, pero sin embargo, la mayoría de los sistemas expertos tienen los componentes básicos presentados en la figura 2.3.



**Figura 2.3:** Estructura general de un sistema experto.

## **2. SISTEMAS EXPERTOS Y METODOLOGÍAS**

---

### **2.2.6.1 Base de datos y base de conocimiento**

La base de conocimiento contiene los conocimientos que se requieren para el desarrollo del sistema, es un elemento ordenado y estructurado suministrado por los expertos que requiere que los expertos humanos repiensen, reorganicen, y reestructuren el conocimiento. De forma general el conocimiento se representa mediante afirmaciones de validez general como reglas, distribuciones de probabilidad, etc. La diferencia existente entre datos y conocimiento se basa en que con los primeros se refieren a la información relacionada que se almacenan permanentemente en una base de conocimiento, mientras que los segundos se almacenan en una memoria.

La base de conocimiento es un componente que permite la adquisición del conocimiento. Se caracteriza por tener un flujo de nuevos conocimientos que va desde el experto humano hacia la base de datos que contiene el conocimiento, determinando si el conocimiento recientemente obtenido es redundante, obsoleto, contiene nuevas o antiguas reglas y decidiendo si la información debe ser almacenada en la base de conocimiento, para ello se realiza un control de la coherencia que controla la consistencia y estabilidad de la base de datos.

### **2.2.6.2 Motor de inferencia**

Elemento básico del sistema cuya función principal es obtener conclusiones, con este fin, el sistema aplica el conocimiento abstracto (inferencia) del sistema a los datos (base de hechos) con los que trabaja. El motor de inferencia obtiene conclusiones basadas en conocimientos deterministas o basados en reglas utilizando un mecanismo de razonamiento lógico o conocimiento probabilístico.

### **2.2.6.3 Interfaz de usuario**

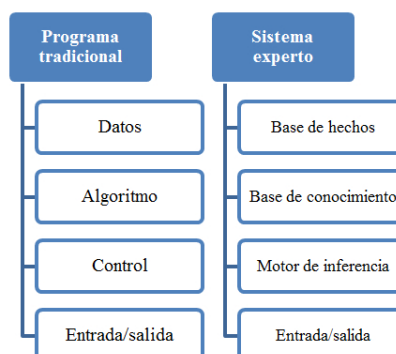
Mecanismo que permite la relación entre el sistema experto y el usuario. La interfaz de usuario es un componente que permite mostrar y obtener la información de forma fácil y agradable, estos deben tener las siguientes características: el aprendizaje del manejo debe ser rápido, debe evitarse en lo posible la entrada de datos errónea, los resultados deben presentarse en una forma clara para el usuario, las preguntas

y explicaciones deben ser comprensibles. El interfaz de usuario debe mostrar información sobre la ejecución de órdenes del sistema y mediante un componente o subsistema de explicación, cuando el sistema requiera de ésta.

### 2.2.7 Diferencia con los programas convencionales

La diferencia fundamental entre un programa convencional y un sistema experto se encuentra, según [Durkin, 1990], en que los programas convencionales procesan los datos, mientras que los SE procesan conocimiento.

De manera más específica se puede realizar una comparación entre ambos y se observa que los sistemas expertos trabajan con información simbólica y no numérica, lo que les permite relacionar información de hechos para generar conocimiento e inferir nueva información, mientras los programas convencionales utilizan algoritmos para procesar datos, es decir, solucionan problemas mediante un conjunto de pasos específicos. Los SE utilizan técnicas de razonamiento heurístico capaces de obtener conclusiones sobre el problema, sin seguir una secuencia de pasos fija. Otra característica de los SE es la capacidad de trabajar con información que es imprecisa o incompleta, y completarla mediante la interacción con el usuario gracias, en muchos casos, a la capacidad de generar preguntas a partir de las cuales generar una solución. Por contra, un sistema convencional necesitaría información precisa y completa. Se podría esquematizar esta diferencia como se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2.4:** Diferencia entre programación tradicional y SE.

## **2. SISTEMAS EXPERTOS Y METODOLOGÍAS**

---

### **2.3 Metodologías**

A continuación se presenta el conjunto de metodologías que se aplican a los SE, aunque existen otras áreas relacionadas con las ciencias sociales, tales como la psicología, las ciencias cognitivas y el comportamiento humano a las que también se pueden aplicar los SE. El uso de métodos cualitativos, cuantitativos y científicos junto con la integración de estas metodologías permite crear sistemas capaces de realizar las tareas del experto y generar nuevos conocimientos a partir de los cuales resolver otros problemas o adaptarse a los cambios de los mismos.

Siguiendo un esquema de las posibles metodologías utilizadas para crear SE se exponen a continuación sus áreas de aplicación.

#### **2.3.1 Sistemas basados en reglas y sus aplicaciones**

Las reglas deterministas son una metodología sencilla y muy utilizada en SE. Donde el conocimiento obtenido de un experto humano se expresa en forma de reglas [Grosan y Abraham, 2011]. Por reglas se entiende una proposición lógica que, a partir de una premisa, genera una conclusión. Son reglas del tipo IF - THEN (“si premisa, entonces conclusión”), también denominadas Modus Ponens ( $a \rightarrow b$ ). Estas reglas o base de conocimiento se utilizan para realizar operaciones sobre los datos de inferencia (hechos o evidencias) con el fin de llegar a una conclusión apropiada.

En esta metodología es importante dar información consistente pero no siempre es posible. Hay situaciones en las que las reglas son inconsistentes, o incluso los hechos no son factibles, y un sistema podría dar soluciones inadmisibles o absurdas. Es por ello que para estos sistemas es clave el cumplir dos objetivos: no permitir al usuario dar información inconsistente y evitar que el conocimiento contradictorio afecte el comportamiento de la base de conocimiento.

Otros autores añaden en esta tipología, además de los métodos deterministas, los métodos estocásticos. Son los denominados sistemas basados en la probabilidad o en la incertidumbre y utilizados en situaciones en las que los datos son imprecisos, y los hechos no se pueden reconocer con exactitud. Un ejemplo de estos métodos es la aplicación de sistemas expertos para la búsqueda de enfermedades y diagnósticos en el caso de pacientes en cuyos datos hay ausencias, errores

**Tabla 2.1:** Aplicaciones de los sistemas expertos basados en reglas.

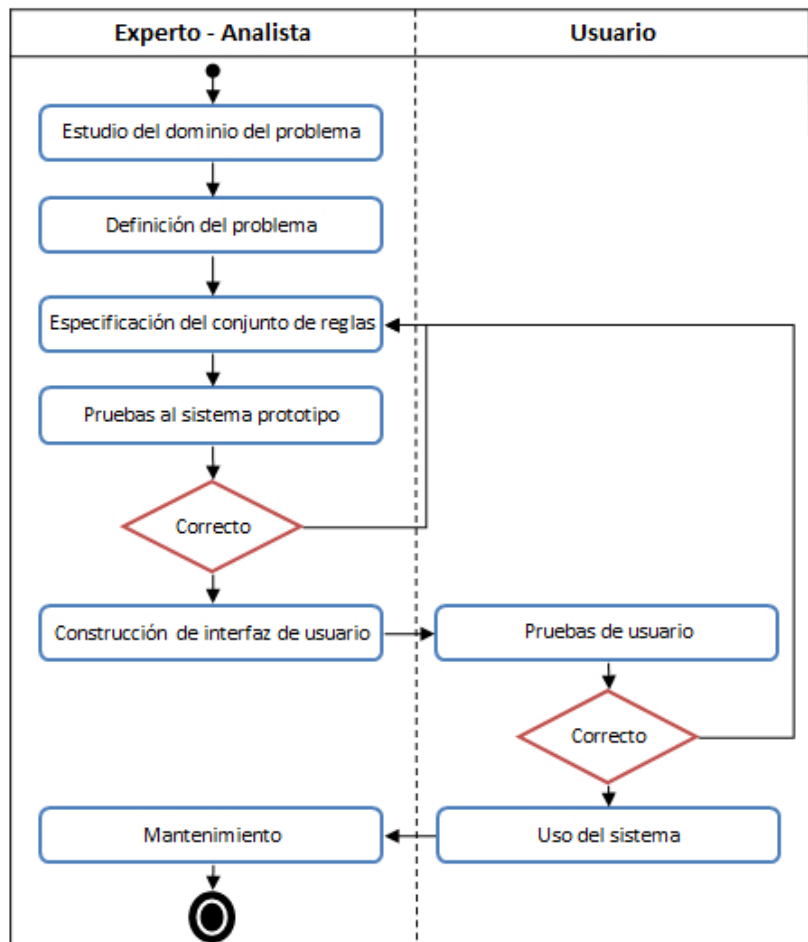
Análisis de transición de estados	Planificación de la producción
Sistemas de aprendizaje o enseñanza	Planificación del proceso de automóviles
Desarrollo de sistemas	Producción de alcohol
Mantenimiento de bases de datos de conocimiento	Evaluación de la gestión del fraude
Representación del conocimiento	Diagnóstico
Diseño de la transformación de la materia	Nanotecnología bioquímica
Planificación de la agricultura	Apicultura
Ciencias de la tierra	Sistemas de tutoría
Tratamiento psiquiátrico	Sistemas de asesoramiento o consulta
Planificadores de energía electrónica	Representación de hiper-grafos
Verificación y validación del conocimiento	Interpretación de histogramas de ADN
Programación de estrategias	Adquisición del conocimiento
Diagnóstico de averías del sistema de comunicación	Bioseparación
Utilización de recursos	Diagnóstico de defectos probabilísticos
Programación de carga	Diagnóstico y asesoramiento agrícola
Sensor de control	Representación del conocimiento

o subjetividad. Se trata de una metodología con poco éxito por sus inconvenientes, entre ellos la necesidad de un alto número de parámetros y la dificultad de estimar para dar soluciones realistas. Las redes bayesianas son la única de las metodologías probabilísticas ampliamente aceptadas que permite resolver este inconveniente. La tabla 2.1 presenta algunas de las aplicaciones de los sistemas expertos basados en reglas.

En la figura 2.5 se muestra como es el proceso para el estudio y creación de un SE basado en reglas. La figura representa el conjunto de actividades que conforman el proceso en el que interviene el experto o analista, y la intervención del usuario en el proceso, mediante la validación del sistema tras la realización de las correspondientes pruebas.

## 2. SISTEMAS EXPERTOS Y METODOLOGÍAS

---



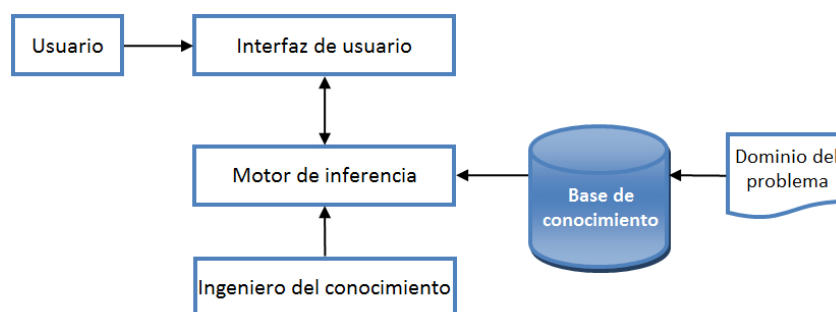
**Figura 2.5:** Proceso para el estudio y creación de un SE.

### 2.3.2 Los sistemas basados en el conocimiento y sus aplicaciones

Los *Sistemas Basados en el Conocimiento* (SBC) se centran en el carácter humano. Los SBC tienen sus raíces en la inteligencia artificial y son intentos de comprender y poner en marcha el conocimiento humano en un sistema dirigido por un ordenador [Wiig, 1994].

En la figura 2.6 se presentan los cuatro componentes principales de un SBC, éstos son [Dhaliwal y Benbasat, 1996]:

- Una **base** de conocimiento que contiene los conocimientos acumulados sobre el problema específico a resolver.
- Un **motor de inferencia** que proporciona la capacidad de razonamiento para interpretar el contenido de la base de conocimiento.
- Una **herramienta** de ingeniería del conocimiento que el experto y el ingeniero del conocimiento usan para crear el SE.
- Una **Interfaz** específica para el usuario que permite interactuar con el SE.

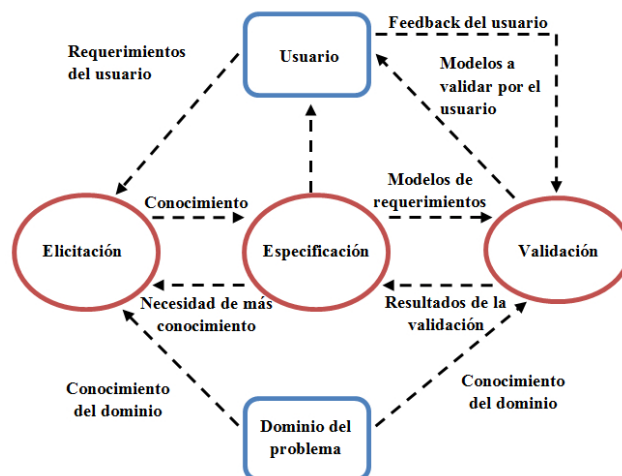


**Figura 2.6:** Esquema de un SBC.

Un SBC incluye todas las aplicaciones tecnológicas que se utilizan para organizar la información. Éstas son útiles en la gestión de reglas de conocimiento de una organización. Otros ejemplos son los sistemas basados en software colaborativo (groupware), y los sistemas de gestión de bases de datos (DBMS) [Laudon y Laudon, 2002].

En la figura 2.7 se muestra como es el proceso para el desarrollo de un SBC.

## 2. SISTEMAS EXPERTOS Y METODOLOGÍAS



**Figura 2.7:** Procesos de los SBC.

**Tabla 2.2:** Aplicaciones que están basadas en el conocimiento.

Tratamientos médicos	Análisis de fallos de ingeniería
Gestión de la producción	Soportes de decisión
Representación del conocimiento	Diseños de electrónica
Gestión de incidencias químicas	Juegos de negocio
Gestión de la agricultura	Gestión estratégica
Tratamiento de residuos	Interpretación iso-cinética
Planificación de la terapia	Planificación de localización de apagones
Casos de validación	Planificación de la agricultura
Planificación de la producción en cultivos	Diseño urbano
Planificación de finanzas personales	Gestión de residuos
Ingeniería térmica	Gestión del conocimiento
Evaluación de edificios	Análisis financiero
Segmentación automática de tumores	Predicción climática
Diseño de la composición del acero	Protección del medio ambiente
Aprendizaje y toma de decisiones	Control de procesos químicos
Procesos de control de una planta	Diseño de sistemas concurrentes
Diseño de chips	Protección de las transmisiones de potencia
Modelado químico en la troposfera	Robots planares

La tabla 2.2 presenta algunas de las aplicaciones que están basadas en SBC.

### 2.3.3 Las redes neuronales y sus aplicaciones

Una *Red Neuronal Artificial* (RNA) es un modelo que emula una red neuronal biológica. Este concepto se utiliza para implementar simulaciones de software cuya



finalidad es realizar procesos paralelos de forma masiva que involucran elementos interconectados en una arquitectura de red.

En una RNA cada neurona artificial recibe entradas que son análogas a los impulsos electroquímicos que reciben las dendritas de otras neuronas, y envía señales a través del axón. Estas señales artificiales se pueden cambiar de manera similar a los cambios físicos que ocurren en los nervios en las sinapsis [Turban y Aronson, 2001a].

Las redes neuronales son eficientes en tareas de reconocimiento de patrones, problemas de optimización o de clasificación. Éstas se pueden integrar en un sistema de ayuda a la toma de decisiones, pero no son capaces de resolver todos los problemas, ya que son modelos muy especializados que se pueden aplicar en dominios muy concretos.

La capacidad de memorizar y asociar hechos es la característica humana que se emula en las RNA. Es decir, una RNA imita la capacidad de acumular experiencia. Estos sistemas permiten abstraer parámetros que modelan un problema en base a grandes cantidades de datos. En estos, el experto humano define la arquitectura apropiada para que el propio sistema aprenda a discriminar soluciones. Una vez se ha realizado el entrenamiento de la red, ésta se prepara para el procesamiento de nuevos casos no incluidos en el conjunto de aprendizaje.

La tabla 2.3 presenta algunas de las aplicaciones que están basadas en redes neuronales.

**Tabla 2.3:** Aplicaciones que están basadas en redes neuronales.

Diagnóstico de fallos	Toma de decisiones
Mecanismos de inferencia	Aprendizaje de máquinas
Diseño de distribución de instalaciones	Aprendizaje del conocimiento
Sistemas de robótica	Tratamiento de residuos
Control de procesos de mitigación	Diagnóstico de señales acústicas
Flujo óptimo de la energía	Sistemas de procesamiento de alarmas
Sistemas de diagnóstico	Pronóstico del factor de carga
Control de procesos	Diseño de procesos en minería del oro
Configuración de parámetros	Aplicaciones biomédicas
Ingeniería cerámica	Destilación del petróleo crudo

## 2. SISTEMAS EXPERTOS Y METODOLOGÍAS

---

### 2.3.4 Sistemas expertos difusos y sus aplicaciones

Los SE difusos se desarrollan utilizando la lógica difusa, son sistemas que utilizan la incertidumbre. Esta técnica utiliza la teoría de conjuntos difusos que simula el proceso de razonamiento humano normal, permitiendo a los sistemas que se comporten con menor precisión que la lógica convencional utilizada anteriormente.

Este enfoque se emplea porque la toma de decisiones no es siempre una cuestión de verdadero o falso. Frecuentemente se observan estados de pertenencia intermedios como respuesta a ciertas preguntas o acciones. Además, el uso de la lógica difusa permite dar soluciones muy rápidas a los problemas.

La aplicación de esta metodología tiene sus detractores. Para [Lindley, 1987] “la única descripción satisfactoria de la incertidumbre es la probabilidad”. Es decir, para que toda afirmación sea cierta o no, se puede medir el grado de certeza de ésta y se puede trabajar con el conocimiento en base a estas probabilidades. Según Lindley la probabilidad es la única descripción sensible a la incertidumbre, aunque sigue siendo una cuestión abierta.

La tabla 2.4 presenta algunas de las aplicaciones que emplean SE difusos.

**Tabla 2.4:** Aplicaciones que emplean SE difusos.

Previsión de carga de energía o potencia	Diagnóstico de fallos en procesos químicos
Diagnósticos del sistema de energía	Razonamiento con incertidumbre
Diagnóstico de fallos	Detección de fallos
Tratamiento de aguas residuales	Previsión de abastecimiento de aguas
Procesamiento de análisis online	Integración de herramientas de secado
Análisis de frecuencia de flujo combinado	Búsqueda de trabajo
Seguridad informática	Programación online
Planificación ecológica	Sistemas de control
Integración de conocimientos	Clasificación de sistemas de energía
Evaluación de la demanda	Selección de datos manejables
Clasificación de radiografías	Selección de hotel
Diagnóstico médico	Sistemas de consulta médica
Indexación del rendimiento	Reconocimiento de gestos

### 2.3.5 Metodología orientada a objetos y sus aplicaciones

La metodología orientada a objetos combina los datos junto con los procedimientos específicos que operan con estos y su manejo respecto a otros sistemas de informa-

ción.

En esta metodología en lugar de pasar los datos a los procedimientos, el sistema solicita a los objetos que realicen los procedimientos que están “incrustados” en él. De modo que el objeto es un bloque de software independiente que se puede aplicar en sistemas diferentes sin cambiar su código.

En la actualidad el uso de los sistemas *Orientados a Objetos* (OO) está muy extendido. Aunque durante años los investigadores de la IA han trabajado con lenguajes funcionales, tipo Lisp, en la actualidad, la necesidad de almacenar por separado la “experiencia” y el “conocimiento” ha derivado en el uso de los lenguajes OO y estos se han convertido en la forma de almacenar otro tipo de conocimiento no causal, como son los conocimientos de procesos, objetos, intuitivos, etc. [Graham, 1996]. Además, facilita el mantenimiento y extensión de estos sistemas, gracias a la herencia e interfaces.

La tabla 2.5 presenta algunas de las aplicaciones que emplean las metodologías orientadas a objetos.

**Tabla 2.5:** Aplicaciones que emplean las metodologías orientadas a objetos.

Diagnóstico industrial	Representación del conocimiento
Planificación de la capacidad de la energía eléctrica	Aprendizaje del conocimiento
Mantenimiento de sistemas de energía	Ingeniería del conocimiento
Redes de información de fabricación	Programación sintáctica

### 2.3.6 Razonamiento basado en casos y sus aplicaciones

Fundamentalmente, el *Razonamiento Basado en Casos* (RBC) adapta las soluciones que se aplicaron para resolver problemas anteriores para utilizarlas en la resolución de nuevos problemas. En el RBC, las descripciones de las experiencias de los expertos humanos representan cada uno de los casos. Estos se almacenan en una base de datos para su posterior recuperación cuando el usuario se encuentra con un nuevo caso cuyos parámetros son similares. Ante un problema, un sistema con RBC, busca los casos registrados que tienen características similares al problema actual, selecciona aquel que tenga mayores parecidos y aplica al nuevo caso las soluciones dadas para el caso antiguo. Aquellas soluciones que han tenido éxito en

## 2. SISTEMAS EXPERTOS Y METODOLOGÍAS

---

el nuevo caso se almacenan en la base de conocimiento. Las soluciones que no han tenido éxito también se anexan a la hipótesis de base, junto con las explicaciones de por qué la solución no funcionó [Kolodner, 1993].

Se trata de un aprendizaje incremental, pues cada experiencia nueva está disponible en el futuro.

La tabla 2.6 presenta algunas de las aplicaciones que emplean el RBC.

**Tabla 2.6:** Aplicaciones que emplean el RBC.

Diseño de procesos de fabricación	Gestión del conocimiento
Entrenamiento para la restauración de sistemas de energía	Inspecciones de ultrasonidos
Planificación médica	Aplicación médica
Fallo de diagnóstico	Sistema de educación electrónico o e-learning
Modelado del conocimiento	

### 2.3.7 Modelado y sus aplicaciones

En los SE las metodologías de modelado son interdisciplinarias. Su fin es establecer relaciones formales entre el diseño del modelado lógico de los diferentes ámbitos del problema. Algunos sistemas expertos pueden no ofrecer el máximo potencial porque no han sido utilizados los modelos de optimización adecuados [Mookerjee y Mannino, 1997]. Esta tecnología de modelado se basa en los métodos cuantitativos que analizan los datos para representar o adquirir conocimientos de expertos usando la programación lógica inductiva, algoritmos de IA y otras investigaciones del ámbito que ofrecen otras plataformas para implementar tecnologías para el desarrollo de SE.

La tabla 2.7 presenta algunas de las aplicaciones del modelado.

**Tabla 2.7:** Aplicaciones del modelado.

Control de procesos	Análisis médico
Decisión y gestión de la producción	Evaluación del software
Validación de sistemas médicos	Planificación de tareas de montaje y simulación
Diseño de terminales de transporte	Asignación de proyectos
Clasificación de endometrías de hiperplasias	Diseño de terminales de transporte
Asignación de proyectos	

### 2.3.8 La arquitectura del sistema y sus aplicaciones

La arquitectura del sistema de un SE es similar a un “boceto” de la estructura de ese sistema. Éste ofrece a los usuarios una idea general del sistema de forma que se pueda ver cómo se va a implementar. La arquitectura muestra la capacidad general del sistema, las interfaces de los usuarios, las funciones, el flujo de datos y la gestión del sistema, DBMS, el protocolo necesario, el lenguaje de programación específico, etc. La modularidad de los sistemas permite una adaptación muy gruesa de la estructura del modelo para los requisitos específicos del sistema [Wirtz, 2001].

La tabla 2.8 presenta algunas de las aplicaciones que emplean el diseño de la arquitectura del sistema.

**Tabla 2.8:** Aplicaciones que emplean el diseño de la arquitectura del sistema.

Selección y evaluación de material	Diseño asistido por ordenador
Ergonomía del diseño	Implementación de sistemas ISO
Soporte para las decisiones corporativas	Ingeniería concurrente
Aplicaciones militares	Simuladores de entrenamiento
Configuración de transbordadores	Diseño de estructuras de retención de líquidos

### 2.3.9 Agentes inteligentes y sus aplicaciones

La definición más simple de agente define a éste como “una entidad que percibe y actúa con su entorno” [Russell y Norvig, 2010], destacando su carácter autónomo. En este ámbito de investigación existe una tendencia a definir los sistemas como *Sistemas Inteligentes* (SI). Es importante destacar que esta metodología surge de la aplicación en sistemas complejos, que por su dificultad de mantenimiento suelen dividir el sistema en entidades independientes, para crear los denominados *Sistemas Multi-Agentes* (MAS, *Multi-Agent Systems*) [Huhns y Stephens, 2000].

Un MAS es un sistema formado por varios agentes inteligentes que interactúan para la consecución de ciertos objetivos, o para la realización de tareas [Weiss, 1999]. Esta metodología pertenece a la rama de la IA distribuida y quiere dar solución a los problemas generando SE cuando hay una gran cantidad de datos y aplicaciones que tienen que interactuar para conseguir uno o varios objetivos. Los resultados de las simulaciones artificiales que aplican MAS confirman que somos

## 2. SISTEMAS EXPERTOS Y METODOLOGÍAS

---

capaces de reproducir razonablemente bien el comportamiento humano [López-Paredes et al., 2002].

La tabla 2.9 presenta algunas de las aplicaciones implementadas con los agentes inteligentes.

**Tabla 2.9:** Aplicaciones implementadas con los agentes inteligentes.

Sistemas tutoriales	Cadenas de suministro
Diseño y análisis de sistemas	Mantenimiento de sistemas electrónicos
Reglas de contaminación del carbón	Representación del conocimiento
Simulación industrial	Sistemas adaptativos
Control de la polución del aire	Diseño de arquitecturas de construcción
Automatización del aceite de oliva	Soporte de decisiones agrícolas
Plataformas de ingeniería del conocimiento en las web	

### 2.3.10 Ontología y sus aplicaciones

La ontología es un sistema de vocabulario que se utiliza como concepto fundamental para describir e identificar las tareas y dominios del conocimiento. La ontología es la transformación a un dominio de conocimiento a un estado semántico, que muestra la contribución que un ser humano puede proporcionar [Matkar y Parab, 2011]. Este vocabulario se emplea como base de comunicación entre los expertos y los ingenieros del conocimiento. Esta base de conocimiento permite generar programas con los cuales adquirir o reutilizar conocimiento, generar algoritmos y heurísticas de aprendizaje a partir de la reutilización de las tareas y los modelos que conforman el dominio del conocimiento.

La tabla 2.10 presenta algunas de las aplicaciones que emplean la ontología.

**Tabla 2.10:** Aplicaciones que emplean la ontología.

Soporte a las decisiones médicas	Reutilización del conocimiento
Control preventivo	Adquisición de conocimiento
Heurística de poda en el ajedrez	Modelado del conocimiento

### 2.3.11 Metodología de base de datos y sus aplicaciones

Una base de datos es una colección de datos organizados para servir de manera eficiente a muchas aplicaciones, al centralizar los datos y minimizar los datos redundantes [McFadden et al., 2001].

Un DBMS (*DataBase Management System*) o sistema administrador de base de datos es un software que permite a una organización centralizar todos sus datos para una gestión eficaz que permita facilitar el acceso a los datos almacenados por los programas [Laudon y Laudon, 2002]. Sin embargo, la búsqueda de conocimiento es computacionalmente costosa cuando las bases de datos son muy grandes. Por esta razón las metodologías de base de datos modernas, como minería de datos y búsqueda aproximada procesan grandes volúmenes de datos con diferentes formatos y jerarquías.

Es importante destacar el valor de la minería de datos, que sustituye el análisis dirigido a verificar, por el análisis dirigido a la búsqueda de conocimiento, su diferencia radica en que esta última permite descubrir información sin necesidad de realizar una hipótesis previa [García et al., 2002].

Existen muchos sistemas expertos que no pueden ser concebidos sin la existencia de los sistemas de base de datos, por el conocimiento con el que operan y las necesidades de gestión que estas aplicaciones necesitan.

La tabla 2.11 presenta algunas de las aplicaciones que especialmente ejecutan las metodologías actuales de base de datos.

**Tabla 2.11:** Aplicaciones que especialmente ejecutan las metodologías actuales de base de datos.

Planificación de sistemas de energía	Planificación geográfica
Sistemas de información geográfica	Interpretación de roca sedimentaria
Diagnóstico de la medicina tradicional china	Sistema experto médico

### 2.3.12 Conclusiones

Tras el análisis de las diferentes metodologías se puede observar que los sistemas expertos han sido aplicados a la agricultura, la química, la geología, la medicina, la informática y demás ingenierías.

## **2. SISTEMAS EXPERTOS Y METODOLOGÍAS**

---

Tras esta revisión general de las metodologías de investigación incluidas en el término SE, basada en la revisión de [Liao, 2005], se puede observar que para la creación de un sistema experto se deberán explorar las diferentes metodologías antes mencionadas y buscar aquellas metodologías que mejor se ajusten a la naturaleza del problema. Por tanto, ésta dependerá del dominio del problema y de la experiencia o conocimiento de los ingenieros. Es por ello que algunas aplicaciones tienen un alto grado de superposición de diferentes metodologías.

Este apartado relaciona el término SE con las metodologías. En los próximos apartados se observará como algunas de ellas se utilizan e incluso generalmente se solapan en los sistemas destinados al diseño, desarrollo y gestión de edificios energéticamente sostenibles.



*La peor decisión es la indecisión.*

Benjamin Franklin

CAPITULO

# 3

## Sistemas de ayuda a la toma de decisiones

### 3.1 Introducción

Los sistemas de ayuda a la toma de decisiones (DSS, *Decision Support System*) son sistemas de gran complejidad debido a la cantidad de variables, sus interrelaciones, y a la calidad que requieren los diseños de bases de datos, modelos y sistemas de acceso a la información.

En este tipo de sistemas, la toma de decisiones generalmente supera las capacidades cognitivas humanas debido a la cantidad de variables involucradas y a sus interdependencias, e incluso a las situaciones personales de los decisores. Éstas están a menudo mermadas por la complejidad y el estrés [Picaza et al., 2001]. La acción de decidir implica elegir entre varias alternativas obteniendo una solución que mediante una presentación y justificación permita la adecuada tramitación de la acción. Los sistemas de decisión permiten aplicar conocimiento científico que puede ser transferido a otros problemas (o incluso dominios) permitiendo analizar, explicar y argumentar acerca del problema de decisión. Este conocimiento se puede representar por ecuaciones o reglas lógicas, mejoradas con una representación explícita.

### 3. SISTEMAS DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES

---

Frente a los modelos matemáticos que consisten en un conjunto de variables y especificaciones, los modelos de toma de decisión permiten generar medidas de preferencia, opciones de decisión y valores de incertidumbre, los cuales posibilitan asumir una buena decisión, resultante del uso de un proceso que considera todos los factores importantes, y que es explícito respecto de las alternativas de decisión, preferencias e incertidumbres.

Los sistemas de ayuda a la toma de decisiones se basan en la selección de alternativas para resolver problemas cotidianos en donde se tiene un abanico de posibilidades, mediante la aplicación de modelos matemáticos, heurísticas, etc. Los sistemas inteligentes actuales son sistemas diseñados para soportar los complejos análisis requeridos para descubrir las tendencias de la actividad que procesan. La información obtenida de estos sistemas permite a los usuarios tomar decisiones basadas en análisis exactos mediante la información interactiva que estos sistemas aportan.

El concepto de DSS es extremadamente amplio y su definición varía dependiendo del punto de vista del autor. Para evitar descartar alguno de los tipos de DSS existentes, se podría definir como un sistema informático interactivo que ayuda a los usuarios a clasificar, juzgar y decidir sobre actividades o hechos.

#### 3.1.1 Definiciones

A continuación se presentan algunas de las definiciones que se pueden encontrar en la literatura:

Un DSS es “un sistema basado en la computación que ayuda en el proceso de toma de decisiones” [Finlay, 1989].

Un DSS es “un sistema de información interactivo, flexible y adaptable, especialmente desarrollado para ayudar en la solución de un problema de gestión no estructurado para mejorar la toma de decisiones. Utiliza datos, proporciona una interfaz amigable y permite la toma de decisiones en el propio análisis de la situación” [Turban, 1990].

Un DSS es un “conjunto de procedimientos basados en modelos para procesar datos y juicios para asistir a un gerente en su toma de decisiones” [Little, 2004].

Un DSS “combina recursos intelectuales individuales con las capacidades de un ordenador para mejorar la calidad de las decisiones (son un apoyo informático para los encargados de tomar decisiones sobre problemas semiestructurados)” [Keen, 1980], aunque el autor precisa que es imposible dar una definición precisa, incluyendo todas las facetas de los DSS, ya que “no puede haber una definición de los sistemas de ayuda a la decisión, sino sólo la ayuda a la decisión”.

Un DSS es un sistema extensible capaz de ayudar ad-hoc en el análisis de datos y el modelado de decisiones, está orientado a la planificación y utiliza intervalos irregulares no planificados [Keen, 1980].

Otra definición sería: “Sistemas informáticos interactivos que ayudan a los encargados de tomar decisiones utilizando datos y modelos para resolver problemas no estructurados” [Sprague y Carlson, 1982].

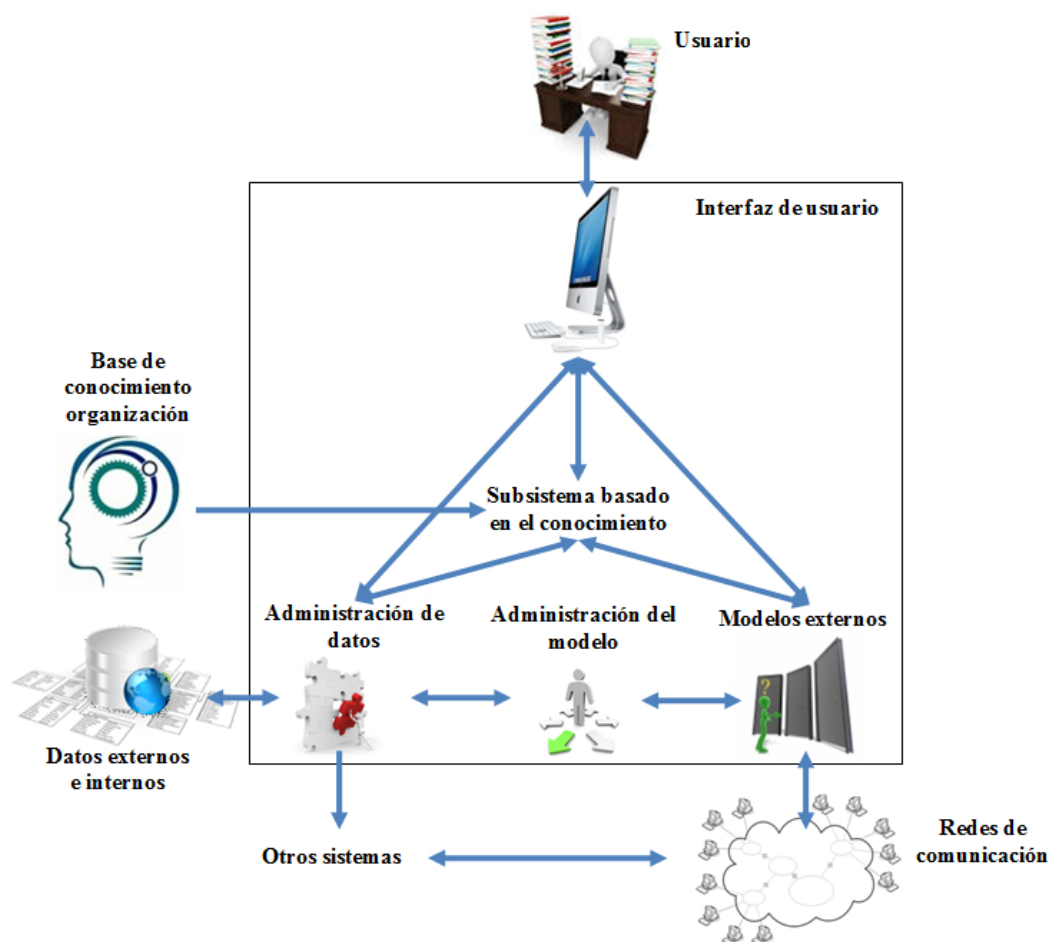
Como se puede observar en la diversidad de definiciones, la mayoría de los DSS tienen alguno de estos atributos o características:

- Ayudan a la toma de decisiones a los usuarios individuales o colectivos de cualquier nivel, a través de la combinación del juicio humano e información objetiva.
- Soporta varias decisiones interdependientes y/o secuenciales.
- Ayuda en cualquiera de las fases del proceso de toma de decisión.
- Es flexible, se adapta a los usuarios y sus cambios a través del tiempo.
- Generalmente son sistemas fáciles de construir.
- El aprendizaje a través de los resultados permite refinar la aplicación.
- Los sistemas generalmente permiten la administración del conocimiento con el cual obtener una solución eficiente en problemas muy complejos.

La estructura general de un sistema DSS (figura 3.1), se compone de varios módulos: datos, interfaz de usuario, administración del modelo y administración de los usuarios.

### 3. SISTEMAS DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES

---



**Figura 3.1:** Esquema de un DSS.

La interfaz de usuario la conforma un dispositivo de entrada-salida compuesto por el hardware, el software y otros factores como la facilidad de uso, la accesibilidad e interacción humano-maquina [Turban y Aronson, 2001b]. Este dispositivo permite realizar los procesos necesarios para generar resultados útiles en la toma de decisiones. Algunos de estos sistemas son sistemas de decisión en grupo, y por tanto, necesitan tener una comunicación interactiva con otros miembros del grupo.

Todo DSS necesita, de al menos, una base de datos que cuente con información relacionada con las decisiones y que permita consultas específicas. Las bases de datos pueden ser tanto externas como internas. Además deben permitir al usuario elegir entre diferentes alternativas para tomar decisiones. El subsistema de admi-

nistración de modelos comprende la base de modelos, el sistema de administración de modelos, el lenguaje que modela, el directorio del modelo y el procesador de comandos, integración y ejecución de modelos.

Estos sistemas pueden estar conectados a otras aplicaciones o sistemas específicos necesarios como son: procesadores de textos, hojas de cálculos, paquetes estadísticos, etc.

Finalmente, es el usuario la persona que tiene que tomar la decisión sobre la cual el DSS da asistencia. Existen dos clases de usuarios: los gerentes y los especialistas. Generalmente, los gerentes esperan una interfaz más amigable que aquella esperada por los especialistas ya que estos últimos son más detallistas y están dispuestos a utilizar sistemas más complejos.

#### 3.1.2 Principios de un DSS

[Alter, 1980] presentó los principios que permiten obtener un DSS de éxito:

- Principio 1: El DSS debe mejorar la toma de decisiones. Un sistema DSS debe ser evaluado en la medida que mejore la toma de decisiones y no por ser interactivo, amigable o semi-estructurado. Para que esto se logre, el DSS debe proveer información que antes era inaccesible y debe dar mejores alternativas, evaluadas de forma lógica y que permitan mejorar las implicaciones sobre las decisiones.
- Principio 2: El DSS debe contener toda la “inteligencia” posible acerca del problema del usuario. Una prueba que determina que el DSS tiene la inteligencia suficiente se basa en preguntarle al usuario cómo el sistema mejora la toma de decisiones. Si el usuario es capaz de demostrar o explicar con detalle cómo esto ocurre, lo más probable es que el sistema tenga la inteligencia suficiente para ser útil.
- Principio 3: El DSS debe ser usado en el modo de uso que sea más efectivo en coste. Los modos de uso (modo terminal, intermediario, vendedor, suscriptor, etc.) tienen beneficios y costes particulares, por tanto es necesario saber la calidad de las implementaciones.

### 3. SISTEMAS DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES

---

- Principio 4: El DSS debe ser usado por expertos que entiendan su significado y funcionamiento. Dado que los DSS están formados por modelos analíticos requieren de esfuerzo para ser entendidos de manera que cumplan su propósito. Es necesario que sean usados sólo por personas dispuestas a invertir tiempo para comprender estos modelos.
- Principio 5: El DSS debe ser controlable por el usuario. El usuario debe ser capaz de especificar las opciones de cálculo que desea, cuándo y de qué manera.
- Principio 6: El DSS debe contener cualquier dato, modelo, capacidad e intermediario humano requerido para mejorar la toma de decisiones. El usuario no sólo necesita de listados de datos de manera ordenada sino que también necesita estadísticas e investigación de las operaciones. Esta información debe ser enfocada a través de un modelo matemático explícito de manera que la información sea valiosa para la toma de decisiones.
- Principio 7: El DSS deber ser implementado a través de cualquier estrategia de desarrollo que represente ser la más efectiva en coste y la menos propensa a riesgo durante su establecimiento.

Pese a no ser una garantía de éxito, los siete principios estipulados por [Alter, 1980] sirven para evaluar un DSS, aunque no son una garantía de su éxito en una organización. Es importante destacar, que existen factores sociales como la resistencia al cambio que pueden convertirse en un aspecto crítico que determine el éxito o fracaso del sistema.

#### 3.1.3 La toma de decisiones

El desarrollo de un sistema que de soporte a la toma de una decisión, requiere que se comprenda el proceso mental que se realiza de manera habitual. La toma de decisiones es un proceso dinámico de adquisición, evaluación, integración, desarrollo y explotación de la información que es fundamental para el desarrollo de las capacidades de organización y la consecución de ventajas competitivas en cualquier faceta de la vida. El proceso consta de cinco fases, representadas en la figura 3.2.



**Figura 3.2:** Proceso de decisión.

Todo sistema debe proporcionar las mejores condiciones para realizar cada una de las fases de este proceso. Por ejemplo, en la selección de un tipo de ventana para un edificio, durante la fase de diseño. Para la toma de decisión de este elemento, se necesita que el sistema obtenga la mayor cantidad de datos que afecten a las condiciones energéticas del edificio y confort de sus ocupantes (ej. dimensiones de la sala y la ventana, altura en la fachada, orientación de la ventana, sistemas de iluminación, etc.), todos estos datos (percepciones humanas) junto con la base de conocimiento del sistema (memoria humana) definen un problema. El análisis de éste se realiza gracias al conocimiento, a los datos y modelos anteriores, que en el caso de la ventana, se definen como coeficientes de iluminación, temperatura, etc. que se presentan en el interior o exterior del edificio. Analizado el estado del problema, surgen diferentes alternativas, en este punto el sistema debe aportar soluciones de manera rápida. En el anterior ejemplo, el sistema deben permitir al usuario conocer las posibles ventanas a colocar y sus consecuencias (energéticas, económicas, de confort, etc.), estos sistemas deben aconsejar, permitir tomar y aplicar las decisiones correspondientes.

Existen numerosos estudios empíricos que indican que la toma de decisiones humanas está basada en estrategias intuitivas (heurísticas) en vez de en reglas de razonamiento teóricamente sólidas. Esto permite al cerebro humano reducir la carga cognitiva. Generalmente, el modelado de decisiones mediante sistemas de decisión mejora la calidad de las decisiones y permite descomponer el problema en componentes simples que sean bien entendidas y definidas. La realización de estudios de sistemas complejos construido con tales componentes puede ser ayudados por una

### 3. SISTEMAS DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES

---

técnica formal teóricamente sólida. Esto permite aplicar conocimiento científico que puede ser transferido a otros problemas permitiendo analizar, explicar y argumentar acerca del problema de decisión. Este conocimiento se suele estructurar en tres componentes fundamentales que en la mayoría de los casos forman parte de las arquitecturas de los DSS [Picaza et al., 2001]:

- El *Sistema de Gestión de las Bases de Datos* (SGBD), es un elemento o modulo del sistema que contiene el conjunto de datos de los DSS.
- El *Sistema de Gestión de la Base de Modelos* (SGBM), aunque tiene un papel análogo al anterior, su función principal es dar independencia entre los modelos específicos usados en el DSS y las aplicaciones que los aplican. El objetivo de este sistema es transformar datos en información útil para la toma de decisiones y asistir en la construcción de nuevos modelos.
- El *Sistema de Generación y Gestión del Diálogo* (SGGD) o interfaz de usuario. Este elemento permite interactuar y profundizar en el problema mediante interfaces intuitivas y fáciles de usar. Estas interfaces ayudan en la construcción del modelo y en la interacción con el mismo, proporcionando una visión del problema y aportando recomendaciones.

Una clasificación en base a las operaciones de los DSS se presenta en el trabajo de [Alter, 1980], esta incluye siete tipos de DSS:

- Sistemas de almacenamiento que permiten acceder a los elementos o datos.
- Sistemas de análisis de datos que permiten la manipulación de datos que han sido manipulados por herramientas adaptadas a una tarea específica.
- Sistemas de análisis de la información que permitan acceder a una serie de bases de datos orientadas a la adopción de los modelos pequeños.
- Modelos financieros y de contabilidad para calcular las consecuencias de las posibles acciones.
- Modelos de representación de la estimación de las consecuencias de las acciones sobre la base de modelos de simulación.



- Modelos de optimización que proporcionan directrices para la realización de acciones mediante la generación de una solución óptima en consonancia con una serie de limitaciones.
- Modelos de sugerencia que realizan la transformación lógica que conduce a una decisión específica sugerida para una tarea bastante estructurada y bien entendida.

Los DSS permiten a los analistas o gerentes examinar los inconvenientes y asumir la seguridad, la incertidumbre o riesgo en una situación de decisión. En estos modelos se debe considerar:

- La certeza, para la cual se debe cuestionar si existe información suficiente para asumir las decisiones con seguridad, los modelos basados en este supuesto son fáciles y pueden dar soluciones óptimas.
- La incertidumbre, cuestiona si la información es poco fiable e impredecible y por tanto, si existe una situación de incertidumbre. Los analistas deben tratar de evitar asumir la incertidumbre porque es muy difícil de modelar ese tipo de situación, para lo cual es necesario trabajar en la obtención de la mayor cantidad de información posible.
- El riesgo, considera si es cierta la información que falta o se basan en previsiones y por tanto existe un riesgo asociado a los resultados. Las hipótesis de los analistas y gestores de DSS limitan o restringen los tipos de modelos que se pueden utilizar para construir un DSS para la situación.

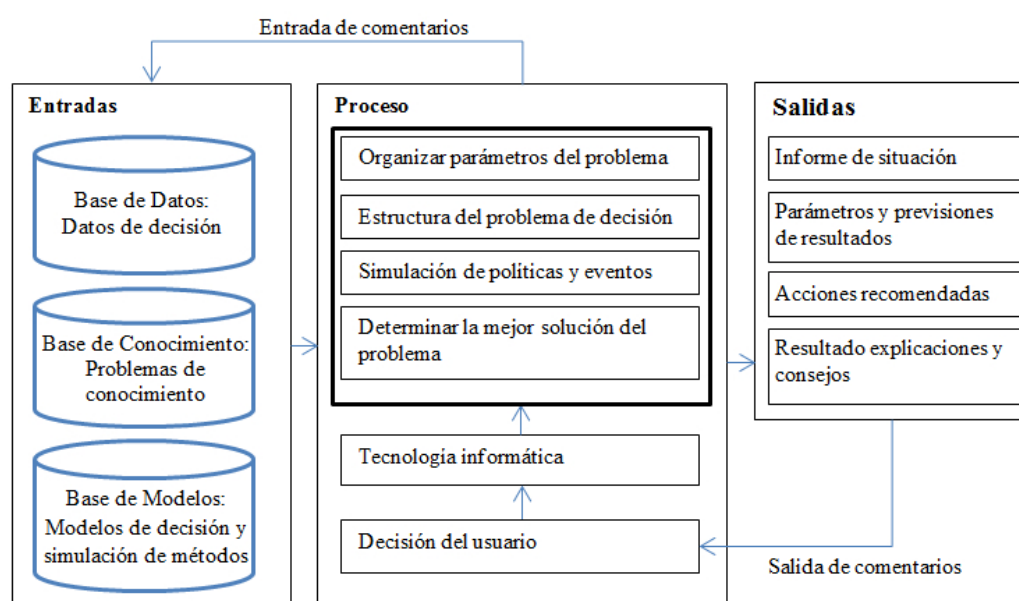
Para [Forgionne, 2000] el proceso de toma de decisiones incluye cuatro fases o etapas:

- Inteligencia: comprende la observación de la realidad, el entendimiento y la adquisición de la información necesaria.
- Diseño: desarrollo de criterios y alternativas de decisión e identificación de restricciones.

### 3. SISTEMAS DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES

- Elección: evaluación de las alternativas de decisión, desarrollo de las acciones recomendadas que cumplan con los criterios de decisión, etc.
- Aplicación: reflexión sobre el análisis de decisiones, las evaluaciones, los peso de las consecuencias o recomendaciones, etc. que permiten mejorar la confianza en las decisiones, diseñar un plan de aplicación, asegurar los recursos necesarios, hacer un plan de aplicación y puesta en acción.

Estas fases se pueden observar en el modelo conceptual de la arquitectura de un DSS presentado por [Turskis et al., 2007] y que se presenta en la figura 3.3.



**Figura 3.3:** Arquitectura conceptual de un DSS [Turskis et al., 2007].

En las tablas 3.1 y 3.2, se presenta los sistemas de decisión individuales e integrados y el aspecto en el que ayudan.

**Tabla 3.1:** DSS individuales.

Individuales	
Tipo de sistema	Ayuda
Sistema de ayuda a la decisión (DSS)	Especificación de las relaciones entre criterios, alternativas y eventos, aporta capacidad de elección.
Sistema de información ejecutiva (EIS) y sistemas de información geográfica (SIG)	La inteligencia, el desarrollo de criterios de decisión, la identificación de eventos incontrolables relevantes.
Sistemas basados en el conocimiento (KBS)	Desarrollo de alternativas de decisión y elección.
Sistemas de aprendizaje automatizado (MLS)	Evaluación de alternativas de decisión.
Sistemas de aumento de la creatividad (CES)	Diseñar, desarrollar un plan de aplicación, implementar o poner en acción un plan propuesto.

**Tabla 3.2:** DSS integrados.

Integrado	
Tipo de Sistema	Ayuda
Sistema inteligente de ayuda a la toma de decisiones (IDSS) integra las funciones de DSS y KBS (y/o MLS)	Desarrollo de alternativas de decisión, especificando las relaciones entre criterios, alternativas y la elección de los eventos.
Sistema de ayuda ejecutivo (ESS) integra las funciones de DSS y EIS (y/o GIS)	Aporta inteligencia, desarrollo de criterios de decisión, identificación de los eventos incontrolables pertinentes especificando las relaciones entre la elección de criterios, alternativas y eventos.
Sistema de ayuda a la decisión total (WDSS) y grupo de ayuda a las decisiones del sistema (GDSS). Integrar las funciones de DSS y CES	Ayuda a resolver problemas de ganancia/oportunidad mediante la comprensión, el diseño y la elección.
Sistema de ayuda a la gestión (SMS) integra las funciones de DSS, EIS (y/o SIG), y la KBS (y/o MLS)	Aportan inteligencia, diseño y capacidad de elección.

### **3. SISTEMAS DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES**

---

#### **3.2 Conclusiones**

En este capítulo se han presentado los sistemas de ayuda a la toma de decisiones. Siguiendo la definición más general, en esta tesis se presentan estos sistemas que ayudan a clasificar, juzgar y decidir sobre la eficiencia energética de los edificios y su confort. Se destaca que estos sistemas deben de dar mejores alternativas evaluadas de forma lógica, en base al almacenamiento de la “inteligencia” del experto, y ofreciendo al usuario un sistema controlable y que ofrezca resultados que faciliten la labor de éste.

*La naturaleza es fuente de inspiración para un recto proceder*

A.J. Downing

CAPITULO

# 4

## Técnicas de resolución

En este capítulo se presentan las técnicas más interesantes desde el punto de vista de esta tesis. Algunas de ellas se presentan con más detalle por ser aplicadas en las metodologías desarrolladas en esta tesis, o por ser aplicadas en otras investigaciones de interés que se muestran en capítulos posteriores.

### 4.1 Técnicas para la resolución de problemas

Los sistemas expertos y sistemas de ayuda a la toma de decisiones pueden tratar con diferentes tipos de problemas. Los deterministas son aquellos que pueden ser formulados usando un conjunto de reglas que relacionen varios objetos bien definidos. Los estocásticos, son aquellos problemas basados en incertidumbres.

Los estocásticos entran dentro de lo que se denomina Soft Computing, que es la rama de la inteligencia artificial centrada en el diseño de sistemas inteligentes capaces de manejar adecuadamente la información incierta, imprecisa y/o incompleta. Esta cualidad permite abordar problemas reales obteniendo soluciones más robustas, manejables y de menor coste que las obtenidas mediante técnicas convencionales.

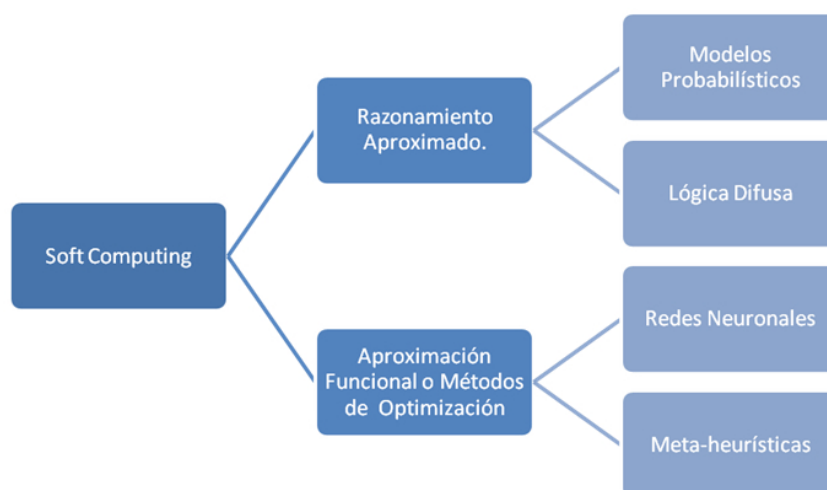
Las principales técnicas que componen el Soft Computing para abordar la resolución de problemas son el razonamiento probabilístico, la lógica y los conjuntos

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

difusos, las redes neuronales y las meta-heurísticas (figura 4.1). Desde que Lotfi Zadeh acuñó el término Soft Computing en 1991, esta área ha experimentado un rápido desarrollo tanto en sus aspectos teóricos como, sobre todo, en sus aplicaciones empresariales.

Las técnicas de Soft Computing abordan problemas de gran diversidad tanto en tipología (modelado, optimización, planificación, control, predicción, minería de datos, etc.) como en el sector de aplicación (producción industrial, logística, energía, banca, agroalimentación, entre otros).



**Figura 4.1:** Esquema de las técnicas resolutivas existentes.

### 4.2 Modelos probabilístico

Los modelos probabilísticos son un tipo de métodos de razonamiento aproximado. Un ejemplo es la teoría de la evidencia de Dempster-Shafer, desarrollada por Dempster 1967 y extendida por Shafer (1979), es una teoría que pretende representar la ignorancia, y manejar las creencias o conocimiento asignado a un evento. Los problemas son definidos como un conjunto de hipótesis mutuamente excluyentes que definen un marco de discernimiento. Para cada elemento de este marco, se define un valor indicativo de la creencia y evidencia depositada en él. La teoría propone un proceso iterativo que evalúa el impacto sobre las hipótesis de sucesivas evidencias, en cada iteración se combina el impacto de la siguiente iteración con una

nueva evidencia. Las redes bayesianas son otro ejemplo de modelo probabilístico, estas representan un problema mediante un grafo dirigido acíclico, cuyos nodos representan variables aleatorias, que pueden ser variables, parámetros o hipótesis. Y las aristas representan dependencias condicionales. A cada nodo se le asocia una función de probabilidad que toma como entrada variables precedentes en el nodo, y generan variables en consecuencia. Todos estos modelos son una representación matemática deducida de un conjunto de supuestos, su uso, tiene como propósito estudiar los resultados y predecir comportamientos futuros, ante un experimento realizado bajo las mismas condiciones.

### 4.3 Lógica Difusa

La vida real está llena de situaciones que requieren del razonamiento aproximado para manipular información cualitativa más que cuantitativa. La información que puede dar un usuario sobre su confort en un lugar suele ser cualitativa, por lo que esta técnica puede ser muy apropiada en futuros SE aplicados a los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, *Heating, Ventilation, and Air Conditioning*), como se muestra más adelante. Igualmente un sistema difuso puede resolver problemas tal como lo haría un experto humano, problemas tales como controlar la temperatura u otras situaciones o elementos que tienen en común el ser complejos y dinámicos, además de ser más fácilmente caracterizados por palabras que por expresiones matemáticas.

#### 4.3.1 Introducción

En la filosofía y la historia del pensamiento científico se encuentran los orígenes de esta técnica. En los inicios, el principio del tercio excluso, enuncia que una proposición es o verdadera o falsa. Más adelante, el pensamiento Epicuro lo refuta al afirmar que tal principio sólo era válido si no existía una posibilidad diferente a los máximos extremos de “verdadero” o “falso”. Veintidós siglos después, Lukasiewicz, redescubriendo a los epicúreos, enuncia el principio de Valencia, el cual establece que cada proposición tiene un valor de verdad; existen proposiciones que no son verdaderas ni falsas sino indeterminadas. Originalmente Lukasiewicz idea

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

tres valores: 0 para falso, 0.5 para indeterminado y 1 para verdadero. Posteriormente, extiende su idea a “n” valores entre 0 y 1. Estos postulados abren la puerta al estudio de las llamadas lógicas multivalentes [Gil Aluja, 2005].

Más adelante en 1965, Lotfi Zadeh en su artículo “Fuzzy Sets” [Zadeh, 1965] introduce el concepto de conjunto borroso para referirse a la clase de conjuntos definidos de un modo impreciso, es decir, con un grado de pertenencia continuo, emulando el razonamiento humano. Zadeh define el conjunto borroso (fuzzy set), como un grupo de objetos con un grado de pertenencia continuo, que está caracterizado por una función de pertenencia que asigna a cada objeto un grado de pertenencia en un rango que va desde cero a uno.

[Mamdani, 1977] extiende las ideas de Zadeh exponiendo una definición de lo que son los sistemas de lógica difusa: “Convierten variables de entrada (cuantitativas y cualitativas) en variables lingüísticas a través de funciones de pertenencia o conjuntos difusos, los cuales son evaluados mediante un conjunto de reglas difusas del tipo si-entonces. Luego las salidas del sistema se convierten en valores nítidos mediante un proceso de concreción (defuzzification), que permiten brindar información para la toma de decisiones”.

Los modelos de lógica difusa se basan en la experiencia de un especialista en lugar de su comprensión técnica del sistema. Por ejemplo, en lugar de tratar con control de temperatura en términos tales como “Temperatura ( $T$ ) =  $24^{\circ}C$ ”, “ $T < 26^{\circ}C$ ” o “ $18^{\circ}C < T < 26^{\circ}C$ ”, se emplean términos como “si [la sala está demasiado fría] Y [la sala está cada vez más fría] ENTONCES [agregar calor a la sala]” o “si [la sala está demasiado caliente] Y [la sala se está calentando rápidamente] ENTONCES [enfriar la sala de forma rápida]”. Se aplican términos muy descriptivos de lo que está ocurriendo, pero son imprecisos aunque dan una respuesta rápida.

La figura 4.2 presenta la estructura de resolución de los problemas difusos. A continuación se presentan sus ventajas e inconvenientes y se detalla cada una de las etapas de resolución.

### 4.3.2 Ventajas e inconvenientes

La lógica difusa goza de diversas características que la convierten en una buena opción para muchos problemas de control. Son sistemas robustos, que no requieren





**Figura 4.2:** Estructura de resolución de problemas difusos.

de entradas precisas sino que permiten una amplia gama de variaciones de entrada.

Las reglas de la lógica difusa están definidas por el usuario que rige el sistema de control y pueden ser modificadas y ajustadas fácilmente para mejorar o alterar drásticamente el rendimiento del sistema.

La lógica difusa no se limita a unas pocas entradas y una o dos salidas de control, ni es necesario medir o calcular los parámetros de la velocidad de cambio a fin de que se apliquen. Esto permite que sea económico e impreciso lo que mantiene el coste general del sistema y la baja complejidad. Sin embargo, existen inconvenientes al usar esta técnica. Ante un problema que tiene solución mediante un modelo matemático, se obtienen peores resultados usando lógica difusa.

En ocasiones, son necesarias múltiples definiciones de operadores y reglas de inferencia difusas. Además, no siempre existe una semántica clara, y resulta compleja la interpretación de valores difusos. Y en otros casos, no hay una buena justificación de los operadores difusos.

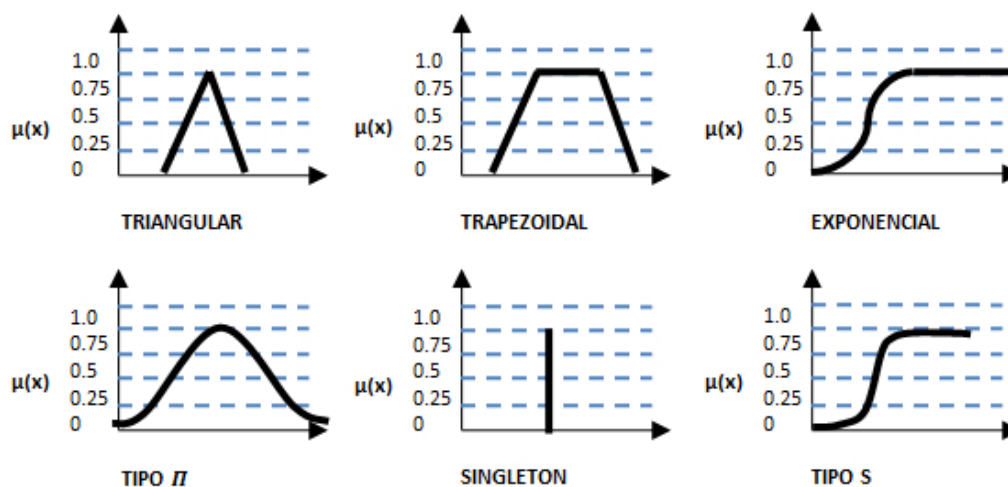
## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

### 4.3.3 Etapas de la lógica difusa

La aplicación de esta técnica se estructura en las siguientes tres fases: fusificación, inferencia lógica y defusificación [Ross, 2009] [Kaur et al., 2013] [Bělohlávek y Klir, 2011].

#### 4.3.3.1 Fusificación

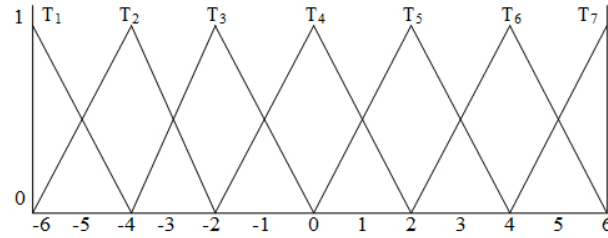
La fusificación (Fuzzification) es la traducción de valores del mundo real mediante el uso de funciones de pertenencia. Ésta primera etapa consiste en modelar cada una de las entradas del sistema con curvas que den los grados o niveles de pertenencia a los diferentes estados. La función de pertenencia determina el grado de pertenencia de los valores de su dominio de definición a un conjunto difuso (o valor cualitativo representado por éste). Como se observa en la figura 4.3 existen múltiples tipos de funciones de pertenencia.



**Figura 4.3:** Funciones de pertenencia más comunes.

El tipo de función de pertenencia está relacionado con el tipo de razonamiento a utilizar como se verá más adelante.

Habitualmente, se toma un vocabulario o conjunto de valores cualitativos común para todas las variables a lo largo de un rango posible de valores numéricos. Dicho conjunto está formado por términos ( $T_i$ ), para funciones de tipo triangular podría tener la estructura de la figura 4.4.



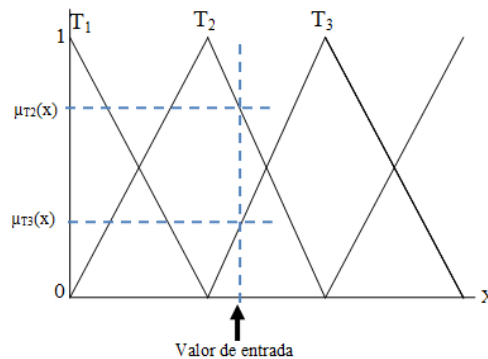
**Figura 4.4:** Ejemplo de función de pertenencia de tipo triangular.

En el caso en que la variable sea discreta la función de pertenencia anterior puede venir definida por la tabla 4.1.

**Tabla 4.1:** Ejemplo de función de pertenencia en forma de tabla.

	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
$T_1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1
$T_2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0
$T_3$	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0
$T_4$	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0
$T_5$	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0
$T_6$	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$T_7$	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

En la figura 4.5 se muestra el proceso de fusificación o determinación del valor de las variables de entrada respecto de los términos lingüísticos, donde el grado real de pertenencia ( $\mu_{T_i}(x)$ ) para las variables de entrada se determina para cada término lingüístico ( $T_i$ ) de la variable lingüística correspondiente.



**Figura 4.5:** Principio de la fusificación.

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

### 4.3.3.2 Inferencia lógica

Después de realizar la fusificación de las variables de entrada y de salida, se deben establecer las reglas que relacionen las entradas con las salidas. Para poder operar con los conjuntos difusos es necesario definir las operaciones elementales entre ellos. Esto implica definir el modo de calcular las funciones de pertenencia a estos conjuntos.

Un sistema de control difuso se basa en la definición de un conjunto de reglas antecedente-consecuente y un conjunto de hechos. Las reglas difusas son del tipo:

$$\begin{aligned} &\text{SI } x_1 \text{ ES } X_1, x_2 \text{ ES } X_2, \dots \\ &\text{ENTONCES } y_1 \text{ ES } Y_1, y_2 \text{ ES } Y_2, \dots \end{aligned}$$

Donde las  $x$  son las variables de entrada del antecedente, las  $y$  son las variables de salida en el consecuente, y las  $X$  e  $Y$  son diferentes valores cualitativos para cada variable de entrada y salida. El sistema se forma por un conjunto de  $n$  reglas, conformando una base de reglas o base de conocimiento:

$$\begin{aligned} R_1: &\text{SI Estado } E_1 \text{ ENTONCES Conclusión } C_1 \\ R_2: &\text{SI Estado } E_2 \text{ ENTONCES Conclusión } C_2 \\ R_3: &\text{SI Estado } E_3 \text{ ENTONCES Conclusión } C_3 \\ &\dots \\ R_n: &\text{SI Estado } E_n \text{ ENTONCES Conclusión } C_n \end{aligned}$$

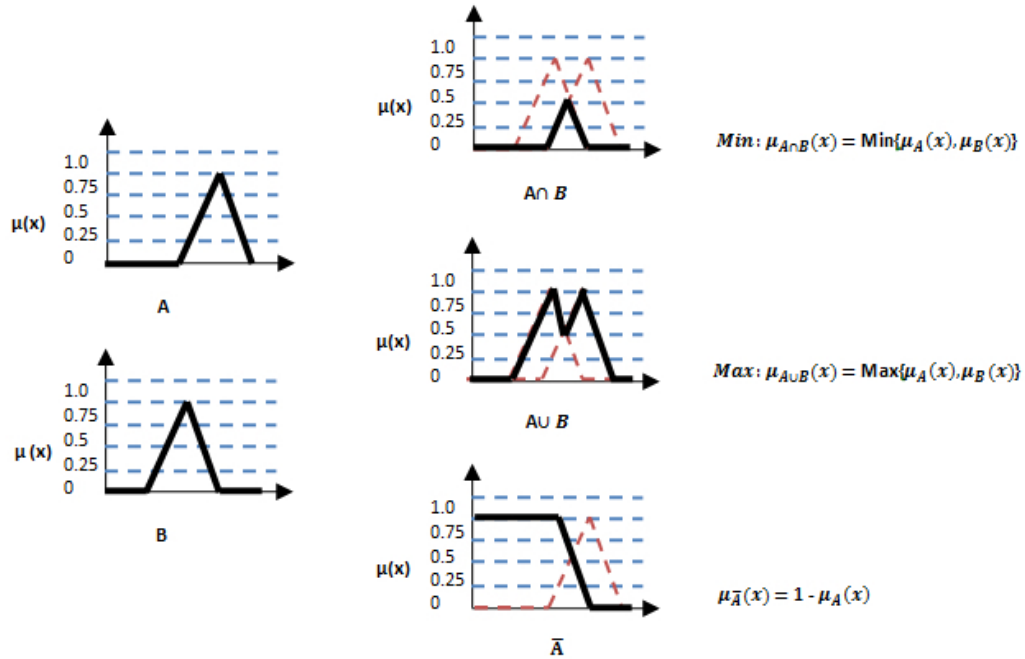
Donde la condición puede consistir en una combinación lingüística de declaraciones, por ejemplo, para la regla  $k$ :

$$E_k = E_{k_1} \text{ AND } E_{k_2} \text{ OR } (\text{NOT } E_{k_3})$$

Respecto de la conclusión de una regla, puede existir más de una, por ejemplo:

$$C_k = C_{K_1}, C_{K_2}$$

La inferencia difusa se establece imponiendo los hechos sobre las reglas para generar funciones de posibilidad a través de combinaciones basadas en operaciones como producto, truncamiento, maximización, minimización, etc. (ejemplo en figura 4.6).



**Figura 4.6:** Ejemplo de operaciones básicas entre funciones de pertenencia.

En realidad, estas expresiones son bastante arbitrarias y podrían haberse definido de muchas maneras. Esto obliga a considerar otras definiciones más generales para las operaciones entre los conjuntos difusos.

Se diferencian tres procesos en la inferencia (Tabla 4.2):

**Agregación** Operación por la cual se calcula el peso de la condición de la regla  $k$ -ésima. Es decir, si se tiene una regla cuyo antecedente es **a and b** y los valores de las funciones de pertenencia son  $\mu_a$  y  $\mu_b$ , entonces la agregación consiste en la combinación  $\mu_a$  **and**  $\mu_b$  (igualmente **a or b**).

**Activación** Consiste en la deducción de la conclusión de una regla. El operador que se utiliza para calcular la conclusión, generalmente es el **mínimo** o **producto**.

**Acumulación** Todas conclusiones activadas son posteriormente acumuladas, utilizando el operador **máximo**, **suma limitada** o **normalizada**.

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

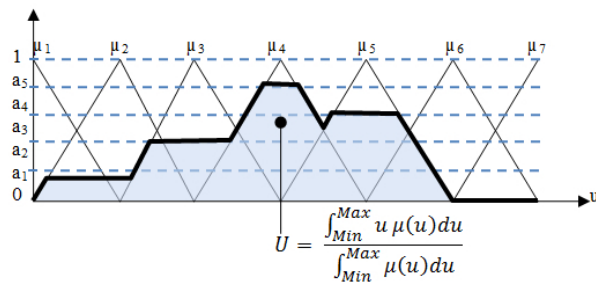
**Tabla 4.2:** Paso de Inferencia.

	Paso de Inferencia
<b>Agregación</b>	
AND	$\mu_{AGREGACION}(u) = \text{Min } \mu_A(x), \mu_B(x)$
OR	$\mu_{AGREGACION}(u) = \text{Max } \mu_A(x), \mu_B(x)$
<b>Activación</b>	
Mínimo	$\mu_{ACTIVACION}(u) = \text{Min } \mu_A(x), \mu_B(x)$
Producto	$\mu_{ACTIVACION}(u) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$
<b>Acumulación</b>	
Máximo	$\mu_{ACUMULADA}(u) = \text{Max } \mu_A(x), \mu_B(x)$
Suma limitada	$\mu_{ACUMULADA}(u) = \text{Min } 1, \mu_A(x) + \mu_B(x)$
Suma normalizada	$\mu_{ACUMULADA}(u) = \frac{(\mu_A(x) + \mu_B(x))}{(\text{Max } (1, (\text{Max } (\mu_A(x) + \mu_B(x)))) )}$

### 4.3.3.3 Defusificación

Después de computar las reglas difusas y evaluar las variables difusas, se necesita trasladar estos valores nuevamente hacia el mundo real. Proceso por el cual se transforma el conjunto borroso resultante en un único número que debería proporcionar una buena representación de la información contenida en el conjunto borroso.

Como se puede observar en la Tabla 4.3, existen varios métodos de defusificación (Defuzzification). El método más popular de defusificación es el cálculo del centro de gravedad (figura 4.7) o centroide, el cual retorna el centro del área bajo la curva. Al igual que en los pasos anteriores existen más métodos de cálculo.

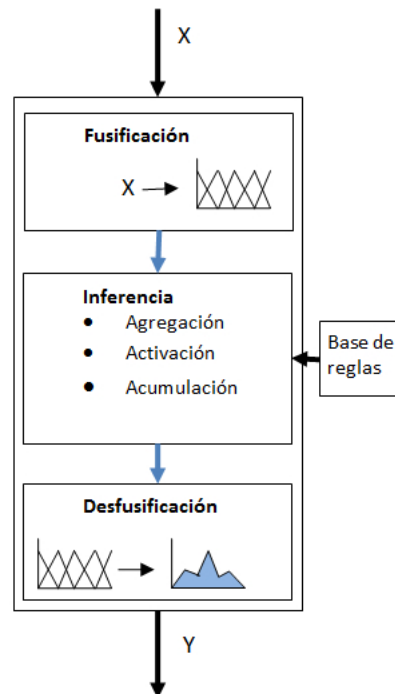


**Figura 4.7:** Ejemplo del COG.

**Tabla 4.3:** Métodos de defusificación.

Métodos de defusificación	Ecuación de cálculo
COG: Centro de gravedad	$U = \frac{\int_{MIN}^{MAX} u\mu(u) du}{\int_{MIN}^{MAX} \mu(u) du}$
COGS: Centro de gravedad para singletons	$U = \frac{\sum_{i=1}^p u_i \mu_i}{\sum_{i=1}^p \mu_i}$
COA: Centro de áreas	$U = u' , \int_{MIN}^{u'} \mu(u) du = \int_{u'}^{MAX} \mu(u) du$
RM: Máximo por la derecha	$U = \sup(u') , \mu(u') = \sup \mu(u) , u \in [Min, Max]$
LM: Máximo por la izquierda	$U = \inf(u') , \mu(u') = \inf \mu(u) , u \in [Min, Max]$

Este conjunto de ideas expuestas de forma muy breve pero, en general, suficientemente clara resume el proceso seguido en los sistemas de lógica difusa (se puede resumir en la figura 4.8).



**Figura 4.8:** Resumen del proceso difuso.

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

Pero en esta área de investigación, han nacido técnicas referidas a sistemas expertos que aplican técnicas más avanzadas, como las bases de datos difusas [Galindo et al., 2006], las bases de datos lógicas y deductivas; clasificación, agrupamientos, aprendizaje o extracción de conocimiento y minería de datos. Que no han sido aplicadas a los SE en el área de los edificios inteligentes.

Aun así, como se puede observar, esta técnica se puede aplicar tanto en sistemas muy sencillos como en sistemas muy complejos.

### 4.4 Redes neuronales

Este apartado pretende introducir el modelo de *Redes Neuronales Artificiales* (RNA). Esta técnica es aplicada en algunas investigaciones y sistemas existentes en los edificios.

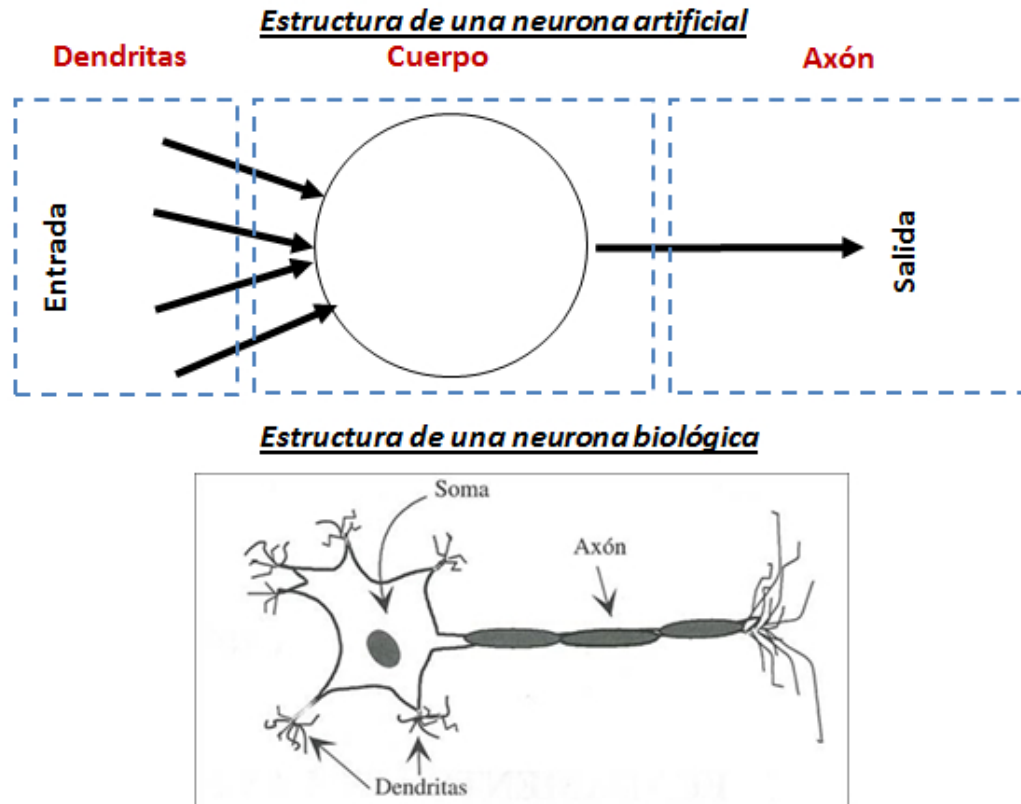
#### 4.4.1 Introducción

Las redes neuronales [Looi, 1992] son un modelo inspirado en los sistemas neuronales biológicos que mediante modelos matemáticos recrean mecanismos artificiales. En estos sistemas se pretende que las respuestas sean similares a las que son capaces de dar desde el cerebro, que se caracterizan por su generalización y su robustez.

En este sistema las unidades de cálculo llamadas neuronas, se encuentran interconectadas. Cada neurona recibe una serie de entradas a través de interconexiones y emite una salida (Figura 4.9).

Las neuronas ejercen tres funciones, la primera es una función de propagación (o excitación), que por lo general consiste en un sumatorio de cada entrada multiplicada por un peso de interconexión. Si el peso es positivo, la conexión se denomina excitatoria, si es negativo, se denomina inhibitoria. La segunda es una función de activación, que modifica a la anterior. La tercera es una función de transferencia, que se aplica al valor devuelto por la función de activación. Se utiliza para acotar la salida de la neurona y generalmente viene dada por la interpretación que se quiere dar a dichas salidas.





**Figura 4.9:** Estructura de una neurona artificial frente a una neurona biológica.

Este modelo se retroalimenta de las entradas y respuestas, pues tiene la capacidad de ajustar sus parámetros. Esto permite a la red reajustar sus parámetros mejorando el equilibrio interno de la red.

En esencia las redes neuronales son capaces de realizar dos tareas diferentes: el reconocimiento de patrones y la síntesis funcional. El reconocimiento de patrones, implica la clasificación de información según ciertas características. La síntesis funcional es la aproximación de funciones, consiste en establecer relaciones entre varias entradas continuas (discretas) y una o más salidas continuas (discretas), por ejemplo, controlar y simular el comportamiento de un sistema HVAC.

Existen diferencias sustanciales entre el tratamiento de la información convencional y el realizado mediante las redes neuronales, como se puede observar en la tabla 4.4.

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

**Tabla 4.4:** Redes neuronales frente al tratamiento convencional.

Redes Neuronales	Tratamiento Convencional
Entrenamiento, aprendizaje	Programación
No se separa la memoria y el procesamiento	Memoria y procesamiento separados
Paralela (discreto o continuo), asíncrona	Secuencial, síncrona
Tolerante a fallos	No tolerante a fallos
Auto-organización	Dependiente del software

Las redes neuronales destacan por sus estructuras de resolución paralela y por su elevada capacidad de generalización (capacidad de producir salidas correctas para entradas no vistas durante el entrenamiento). Según [Hilera y Martínez, 1995] y [Freeman y Skapura, 1993] las redes neuronales tienen una serie de ventajas e inconvenientes.

### Ventajas

- La información se procesa de manera local, es decir, al estar compuesto por unidades individuales de procesamiento cada neurona ejecuta su activación, dependiendo de sus entradas y pesos. Todas las neuronas de una misma capa pueden trabajar de forma paralela.
- Las redes neuronales son capaces de reajustar sus pesos para adaptarse a cambios en el entorno en base a la experiencia (conocimiento de la red). Estas pueden tener la función de activación o de inhibición, es decir afectan de manera substancial a la determinación de si la neurona está o no activa. Esta adaptabilidad es especialmente útil cuando el entorno que suministra los datos de entrada es no estacionario, es decir, algunas de sus propiedades varían con el tiempo.
- Las neuronas son tolerantes a fallos, una red neuronal es tolerante ante fallos en el sentido de que los posibles fallos operacionales en partes de la red solo afectan débilmente al rendimiento de ésta. Esta propiedad es debida a

la naturaleza distribuida de la información almacenada o procesada en la red neuronal.

- Las neuronas pueden reconocer patrones que no han sido aprendidos, solo deben tener cierto parecido con el conocimiento previo que tenga la red. Si la entrada presenta alguna modificación la red podrá identificarla siempre y cuando se mantenga cierto grado de similitud entre lo aprendido y lo mostrado en la entrada a la red.

### Inconvenientes

- La complejidad del aprendizaje, a mayor necesidad de aprendizaje, mayor complejidad.
- El tiempo de aprendizaje de una red es elevado y depende de dos factores, la cantidad de patrones a identificar y la flexibilidad o capacidad de adaptación que se les requiere para reconocer o identificar patrones que sean sumamente parecidos, debido al tiempo de convergencia necesario para que los pesos representen los valores necesarios para los que se les enseña.
- Las redes neuronales aportan soluciones mediante un valor de salida, pero no interpretan el aprendizaje realizado, es la mediación del programador y la aplicación en sí la que encuentra significado a la salida proporcionada.
- Se necesita una elevada cantidad de datos para su entrenamiento, es decir, cuanta más flexibilidad se requiera, más información tendrá que enseñársele para que realice de forma adecuada la identificación.

El artículo de [McCulloch y Pitts, 1943] se considera como el punto de arranque de las investigaciones en redes neuronales. El modelo de McCulloch-Pitts es una neurona binaria.

Ésta calcula la suma ponderada de sus entradas producidas por otras unidades, y da como salida un uno (1) si la suma se encuentra por encima de un valor denominado umbral, o un cero (0) si está por debajo. La ecuación que gobierna el funcionamiento de dicho modelo es la siguiente:

#### 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

$$n_i(t+1) = f\left(\sum_j (w_{ij} \cdot n_j(t)) - u_i\right) \quad (4.1)$$

Donde:

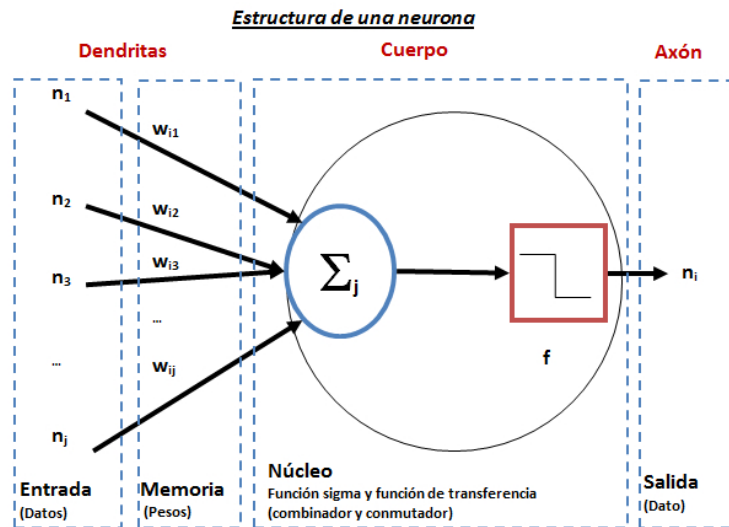
$w_{ij}$  es el peso de la conexión entre la neurona  $i$  y la  $j$

$n_j(t)$  es la salida producida por la neurona  $j$

$u_i$  es el umbral de la neurona  $i$

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < u \\ 1 & \text{en otro caso, es la función umbral} \end{cases}$$

En la figura 4.10, se presenta la estructura de una red neuronal, como se muestra en la ecuación 4.1, existe un axón o una salida, un cuerpo o núcleo que contiene una función de transferencia y las dendritas, estas últimas contienen los datos de entrada ( $n_j$ ) y los pesos de las conexiones o memoria ( $w_{ij}$ ).



**Figura 4.10:** Estructura de una neurona artificial.

La red neuronal más antigua data de 1957 [Hilera y Martínez, 1995], de ésta parte la evolución de las redes neuronales múltiples diseñadas por Frank Rosenblatt. Rosenblatt empezó a desarrollar un modelo de red neuronal de una sola neurona basado en la ley de hebb. Entre las características básicas, esta tenía la capacidad de generalizar, es decir reconocer o identificar patrones que no se le hubieran enseñado, utilizando  $n$  entradas y una salida, esta red, aunque fue una revolución

en su momento, tenía una limitación, no podía clasificar patrones que no tuvieran una separabilidad lineal.

### Ley de Hebb

Fue uno de los primeros algoritmos de entrenamiento de redes neuronales. La idea principal sobre la cual se basa esta ley es la siguiente:

*“Cuando un axón de la célula A está suficientemente próximo para excitar a una célula B o toma parte en su disparo de forma persistente, tiene lugar algún proceso de crecimiento o algún cambio metabólico en una de las células, o en las dos, de tal modo que la eficiencia de A, como una de las células que desencadena el disparo de B, se ve incrementada.”(Hebb)*

Como puede observarse el algoritmo se fundamentó en la idea del refuerzo de las conexiones (o sinapsis en el modelo biológico) más usadas, favoreciendo la excitación de los circuitos neuronales más probables. Es un algoritmo de **aprendizaje no supervisado**, que refuerza las conexiones más utilizadas.

Al modelo de neurona de McCulloch-Pitts se le permite usar varios tipos de funciones de activación. Algunas de las más usadas son descritas a continuación (figura 4.11):

- Funciones lineales: funciones que dan una salida lineal.

- Función identidad:  $f(x) = x ; x \in \mathbb{R}$
- Función lineal a trozos:

$$f(x) = \begin{pmatrix} 0 & \text{si } x < 0 \\ x & \text{si entre } 0 < x < 1 \\ 1 & \text{si } x \geq 1 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

- Funciones escalón: funciones que dan una salida binaria dependiente de si el valor de la entrada está por encima o por debajo del valor umbral.

- Función signo:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

- Función escalón estándar:

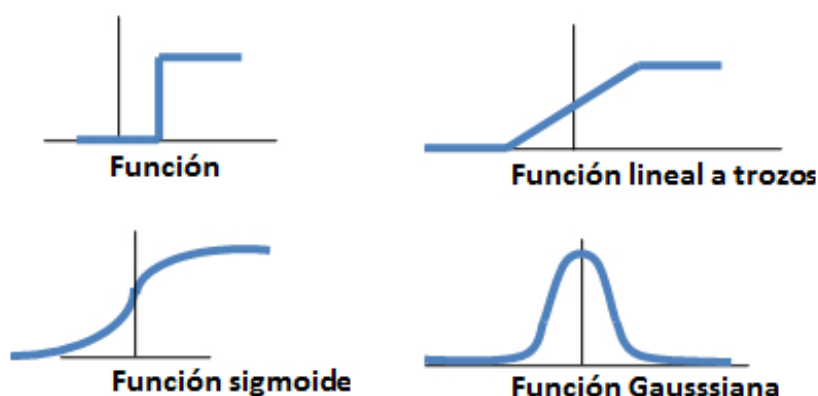
$$\theta(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{array} \right\} \quad (4.4)$$

- Funciones sigmoidales: funciones monótonas acotadas que dan una salida gradual no lineal para las entradas.

- Función logística de 0 a 1:  $f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$

- Función tangente hiperbólica de -1 a 1:  $f(x) = \tanh(x)$

- Gaussiana: esta es la función de la distribución normal y se utiliza cuando la información cercana a la media es la más importante.  $f(x) = e^{-x^2}$



**Figura 4.11:** Funciones de activación.

En la figura 4.12 se presenta un ejemplo de función lineal, en ella las entradas  $n_1$  y  $n_2$  dan lugar a una salida ( $n_i$ ) que determina si los datos son de clase 0 ó clase 1, en función de una función lineal con coeficientes  $w_{i1}$   $w_{i2}$ .

La topología de una red, es decir, la forma en que se interconectan las neuronas de una red neuronal define un grafo dirigido. Si este grafo es acíclico, la red se denomina red neuronal hacia adelante (feedforward network), sin embargo, si esta red posee ciclos, se denomina red neuronal recurrente (*Recurrent Neural Network*, RNN). Para este último, los ciclos existentes tienen un profundo impacto en la capacidad de aprendizaje de la red y las hacen especialmente indicadas para el procesamiento de secuencias temporales.

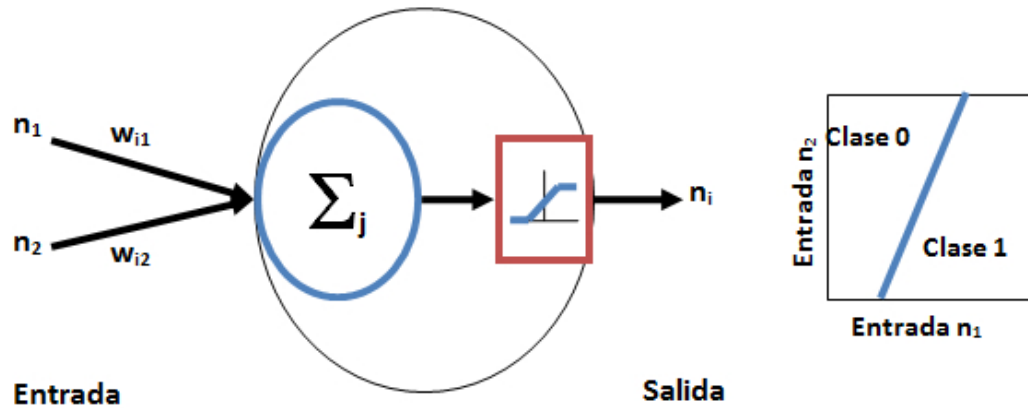


Figura 4.12: Ejemplo de función lineal.

#### 4.4.2 Tipos de redes neuronales

Existen varias tipologías que dependen de la estructura de la red, en la figura 4.13, se pueden ver en color rojo las tipologías más comunes y en color verde la capacidad asociada a estas.

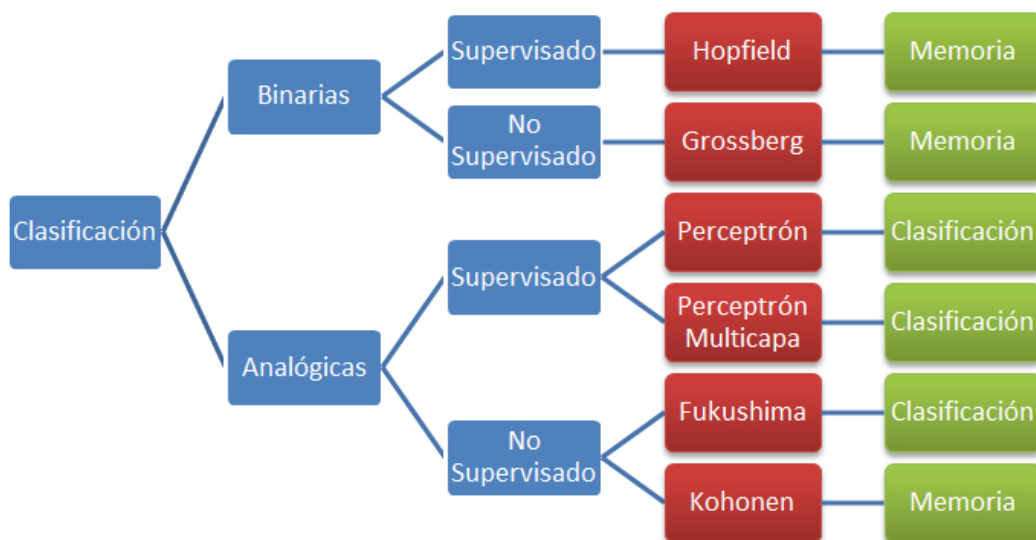


Figura 4.13: Tipología de una red neuronal.

El aprendizaje de las redes neuronales, atiende a varios prototipos de aprendizaje cuya clasificación es la siguiente:

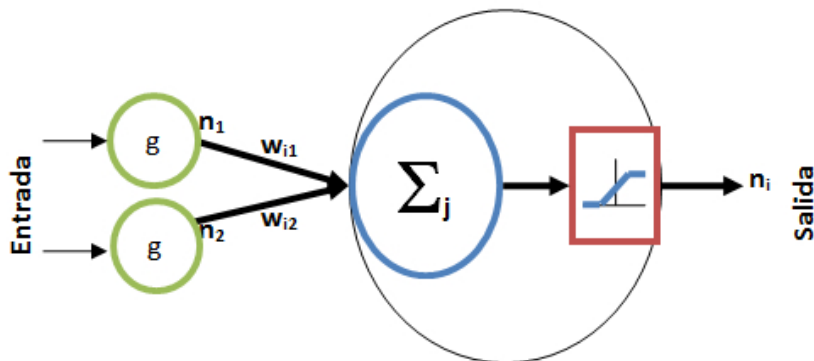
## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

- **Aprendizaje supervisado:** Aprendizaje basado en un conjunto de ejemplos de entrada-salida. La red neuronal realiza un entrenamiento mediante un proceso iterativo de adaptación de manera que sus salidas se aproximen cada vez más a las salidas especificadas en los ejemplos. El proceso de formación de la red neuronal simplemente implica la modificación de los pesos hasta que la salida prevista esté en estrecha concordancia con la salida real.
- **Aprendizaje no supervisado:** En este tipo de redes no se especifican las salidas deseadas. La red neuronal trata de encontrar de manera autónoma los datos de entrada implantando categorías que agrupen a los datos más similares.
- **Aprendizaje híbrido:** La existencia de ambos aprendizajes supervisado y no supervisado, normalmente en distintas capas de neuronas.
- **Aprendizaje con refuerzo:** La red aprende a través de un proceso de ensayo-error que maximiza el índice de desempeño denominado señal de error.

### 4.4.3 El perceptrón

El perceptrón, figura 4.14, se deriva del modelo realizado por [McCulloch y Pitts, 1943] introducido por [Rosenblatt, 1958] que se ha presentado con anterioridad, donde la primera capa actúa como un grupo de sensores que detecta una señal específica, mientras que la segunda toma las salidas y clasifica el patrón de entrada.



**Figura 4.14:** El perceptrón.



La realización del aprendizaje se basa en que las funciones de la primera capa son fijas y determinadas, mientras que las de la segunda se basan en el ajuste de pesos y función umbral. La función de aprendizaje es:  $\Delta w_i = \eta t_i x_i$

Donde,  $n_i$  es la salida del perceptrón,  $t_i$  es la salida deseada, y  $\eta$  (rata de aprendizaje) es un valor constante o variable durante el entrenamiento. Si es variable hay una convergencia rápida del error, pero el aprendizaje es variable.

Existen varios tipos de perceptrones dependiendo del número de capas como se puede observar en la tabla 4.5.

**Tabla 4.5:** Tipo de perceptrones.

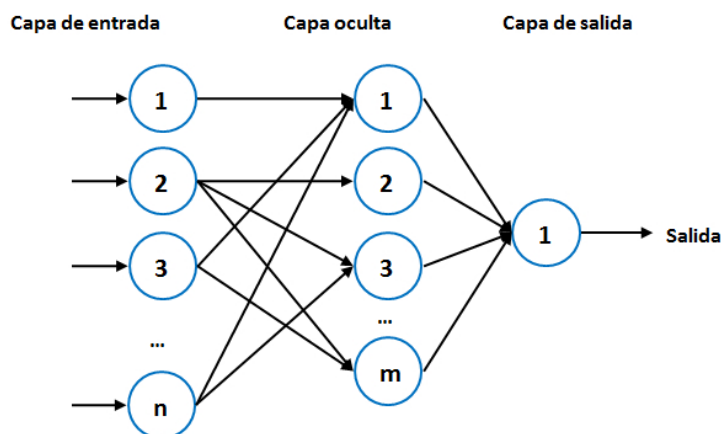
Capas	Establece
1 o 2	Dos regiones
3	Cualquier región convexa
4 o más	Regiones de decisión arbitrariamente complejas

### 4.4.4 Perceptrones multicapa: Backpropagación

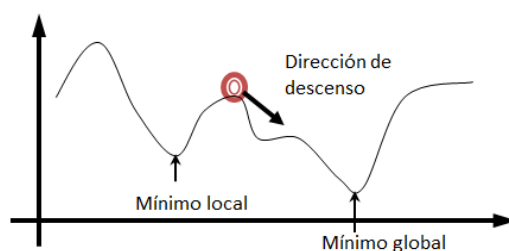
Si todas las neuronas de una capa reciben señales de entrada de una capa anterior y envían las señales de salida a una posterior, la red es llamada multicapa. La figura 4.15 presenta un ejemplo de red multicapa. Estas redes están conformadas por lo general de una capa de entrada, una o varias ocultas y una de salida. Como característica a destacar, las conexiones de los perceptrones multicapa no forman ciclos.

El algoritmo de retropropagación (Back-propagation) es un método de aprendizaje supervisado utilizado para entrenar redes neuronales multicapa feed-forward, basado en la técnica de optimización del gradiente descendente (figura 4.16).

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN



**Figura 4.15:** Perceptrón multicapa.



**Figura 4.16:** Técnica del gradiente descendente.

### Técnica del gradiente descendente

La técnica de gradiente descendente es un procedimiento iterativo que busca minimizar una función moviéndose en la dirección opuesta al gradiente de dicha función [Rumelhart et al., 1986]. Este proceso se puede describir con la siguiente ecuación:

$$x(t+1) = x(t) + \Delta x(t) \text{ donde } \Delta x(t) = \frac{-\partial f}{\partial x(t)} \quad (4.5)$$

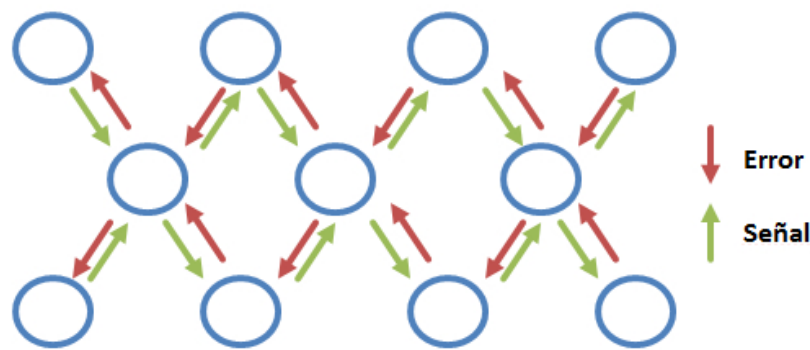
El método exige que la función de activación de las neuronas sea derivable y creciente. La función que pretende minimizar este algoritmo es una función de error descrita por la siguiente ecuación:

$E = \frac{1}{2} \sum (n_{ij} \cdot d_{ij})^2$  Donde:  $n_{ij}$  es la salida de la  $i$ -ésima neurona de salida para la entrada  $j$ .  $d_{ij}$  es la salida deseada de la  $i$ -ésima neurona de salida para la entrada  $j$ .

El algoritmo trabaja de la siguiente forma:

1. Presenta un patrón de entrada a la red neuronal.
2. Propaga dichas entradas hasta la capa de salida.
3. Calcula el error en la capa de salida.
4. Propaga dicho error hacia las neuronas ocultas (hacia atrás).
5. Cambia los pesos de las conexiones.

El procedimiento se hace para todos los patrones iterativamente hasta que la red converja a un valor del error deseado (figura 4.17).



**Figura 4.17:** Propagación de la señal y del error.

### Pasos del algoritmo

1. Inicializar los pesos con pequeños valores aleatorios.
2. Escoger aleatoriamente un patrón de entrada  $x$ .
3. Propagar la señal hacia adelante.
4. Calcular el error en la capa de salida  $\delta(t) = f'(x_i(t)) \cdot (d_i - y_i)$
5. Propagar dicho error hacia las neuronas ocultas (hacia atrás) de la siguiente manera:  $\delta(t) = f'(x_i(t)) \cdot (\sum_j w_{ij} - \delta_i(t))$

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

6. Actualizar los pesos utilizando:  $w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \Delta w_{ji}(t+1)$ , donde  $\Delta w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + [\eta d_j y_i(t) + \alpha \Delta w_{ji}(t)]$
7. Repetir desde el paso 2 hasta alcanzar el error deseado.

### 4.4.5 Red de Hopfield

Las redes Hopfield son redes de adaptación probabilísticas y recurrentes. Tienen memoria asociativa lo que les permite aprender a reconstruir patrones de entrada que memorizan durante el entrenamiento. Estas están estructuradas como una única capa de conexión completa, donde cada unidad tiene una salida binaria (sólo puede tomar los valores 0 o 1) y sigue una regla de aprendizaje no supervisado.

Estas redes, están formadas por N neuronas interconectadas que actualizan sus valores de activación de forma independiente, cada neurona se encuentra conectada a todas las demás pero no consigo misma. Tiene siempre una restricción por simetría en cada conexión, los pesos asociados a las conexiones entre pares de neuronas son simétricos, es decir,  $w_{ij} = w_{ji}$ . Son buenas en la resolución de problemas de optimización. Cuando una neurona mantiene su valor de activación se dice que es estable.

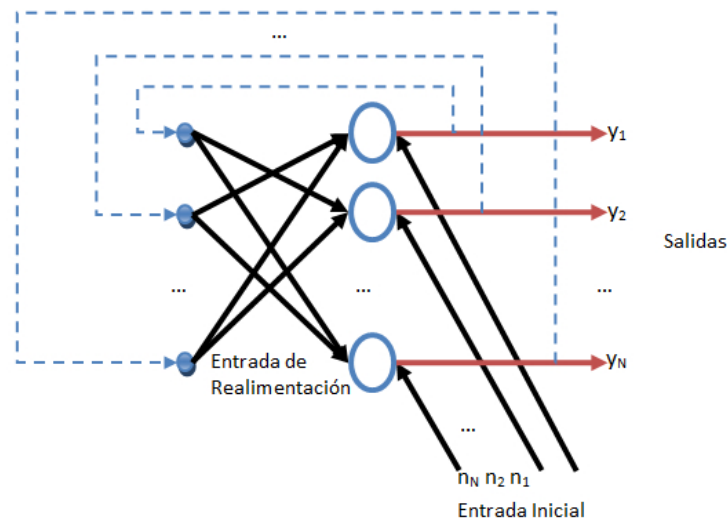
Es lo que se denomina problema de memoria asociativa se trata de recopilar un conjunto de patrones de forma que cuando en estas redes aparece una entrada nueva, se obtiene una configuración inicial más o menos parecida a la de algún patrón memorizado, el sistema hace iteraciones hasta encontrar una configuración estable. La estructura Hopfield se caracteriza por la realimentación (figura 4.18) [Hopfield, 1982].

El funcionamiento se basa en que en un instante inicial ( $t=0$ ) se aplica la información de entrada inicial  $(n_1, n_2, \dots, n_n)$ .  $y_i(t=0) = n_i$  para  $1 \leq i \leq N$

La red realiza iteraciones hasta alcanzar la convergencia, es decir, hasta que los valores de  $y_i(t+1)$  sea igual a  $y_i(t)$ .  $y_i(t+1) = f(\sum_{j=1, N} w_{ij} y_j(t) - t_i)$  para  $1 \leq i \leq N$

Finalmente los valores de convergencia representan el aprendizaje de una configuración estable. El modelo de Hopfield es no supervisado (tipo hebb):

$$\begin{cases} w_{ij} = \sum_{j=1, N} (n_i^{(k)} n_j^{(k)} - t_i) & \text{para } 1 \leq i \leq N; i \neq j \\ 0 & \text{para } 1 \leq i \leq N; i = j \end{cases}$$



**Figura 4.18:** Red de Hopfield.

#### 4.4.6 Modelo de Kohonen

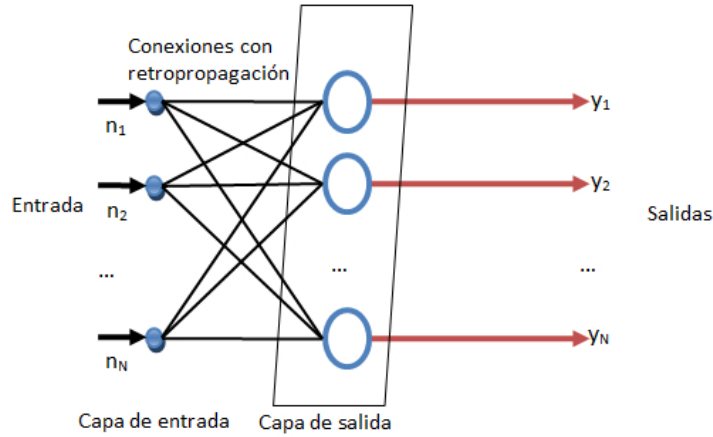
Es una red basada en la capacidad del cerebro humano para formar mapas característicos de la información recibida del exterior. El objetivo de [Kohonen, 1982] era demostrar que un estímulo externo, suponiendo una estructura propia y una descripción funcional del comportamiento de la red, era suficiente para forzar la formación de mapas. Esto supone un entrenamiento (aprendizaje) no supervisado.

La red neuronal Kohonen contiene solamente una capa de neuronas y una capa de entrada que se ramifica para todos los nodos. La red consiste básicamente en dos conjuntos de unidades, formadas por  $N$  neuronas de entrada y  $M$  de salida, cada unidad de salida conectada a los  $n$  nodos de entrada. Las unidades de entrada reciben datos continuos normalizados. La red clasifica los patrones de entrada en grupos de características similares, de tal manera que cada grupo activa siempre las mismas salidas (figura 4.19).

El aprendizaje es de tipo competitivo, es decir, las neuronas de la capa de salida compiten por activarse y sólo una de ellas lo consigue. Se distinguen dos etapas: aprendizaje y funcionamiento.

El aprendizaje es un proceso iterativo en el cual se presentan a la red, patrones de entrada hasta lograr un refinamiento adecuado del mapa topológico de salida.

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN



**Figura 4.19:** Estructura de la red Kohonen.

Para calcular la distancia entre vectores se aplica la siguiente fórmula:  $d_j = \sum_{i=1, N} (n_i^{(k)} - w_{ji})^2$  para  $1 \leq i \leq M$

Inicialmente, la red recibe una información de entrada, cada una de las  $M$  neuronas de la capa de salida la recibe por medio de las conexiones de retroalimentación (feedforward) con pesos  $w_{ij}$ . Además reciben las salidas de las neuronas vecinas por medio de las conexiones laterales, cuya influencia depende de la distancia a la que se encuentren. Al final, una de las salidas neuronales es la vencedora ( $j^*$ ) por lo que se actualizan los pesos de las conexiones entre las neuronas de entrada y dicha neurona, así como las conexiones entre las de entrada y las neuronas vecinas a la ganadora mediante:  $w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \eta[n_i^{(k)} - w_{j^*i}(t)]$  para  $j \in \text{Zona } j^*(t)$

Existen otras estrategias aplicables en las que se recompensa o castiga a las neuronas en virtud de la distancia.

### 4.5 Meta-heurísticas

Ante la dificultad para resolver de forma exacta ciertos problemas, surgen las técnicas heurísticas como algoritmos que proporcionan soluciones factibles, las cuales son alcanzadas en un tiempo razonable. No se trata de soluciones óptimas, sin embargo se pueden clasificar como soluciones satisfactorias. La ventaja principal reside en la mayor flexibilidad en el manejo de las características del problema. El

inconveniente más destacado se encuentra en la calidad de la solución, la cual no se puede conocer, sin conocer la solución óptima.

La aplicación de metaheurísticas es una alternativa para la solución de problemas combinatorios. El bajo nivel de difusión que se les ha dado a las nuevas técnicas de solución de problemas complejos tiene como consecuencia directa que las empresas pierdan oportunidades para operar con más eficiencia y menor coste.

La resolución de un problema de optimización busca encontrar la mejor solución posible a un problema formulado, del cual se puede evaluar la calidad de la solución de forma cuantitativa, generalmente asociada a un coste al que se denomina como función objetivo.

El primer planteamiento que se debe solventar ante un problema de optimización es responder si es fácil o difícil la resolución de éste. A este campo de la investigación se le denomina complejidad computacional, la cual determina si un problema es fácil o no de acuerdo con los algoritmos conocidos para resolverlo.

Un algoritmo [Cormen et al., 2009] es un conjunto ordenado y finito de operaciones que permiten solucionar un problema. El número de operaciones aritméticas aplicadas para la resolución de un problema indica la complejidad de un algoritmo. Así, se considera que un problema es fácil si se resuelve en un tiempo o número de operaciones polinomial. En caso contrario se dice que la resolución del problema es difícil. Esta información tiene especial interés, dado que un problema que se resuelve en tiempo polinomial equivale a saber si es posible encontrar la solución óptima en un tiempo asequible, es decir, unos cuantos segundos o minutos. En el caso contrario, se han desarrollado estrategias para las cuales se pueden encontrar soluciones buenas a un coste computacional razonable.

Clasificaciones:

- Los problemas se clasifican en fáciles o difíciles.
- Los algoritmos se clasifican en exactos o completos (existe la garantía de que encontrarán la solución óptima) y de aproximación o heurísticos (sólo se puede afirmar que encontrarán una solución aceptable, no necesariamente óptima).

En la actualidad, entre los metaheurísticos más exitosos se encuentran el recocido simulado (simulated annealing), la búsqueda tabú (tabú search), los algoritmos

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

genéticos (genetic algorithms) y las redes neuronales artificiales (artificial neural networks). Otras ideas recientes incluyen la optimización por colonias de hormigas (ant colony optimization), la búsqueda local iterativa (iterated local search) y la computación evolutiva (evolutionary computing), entre otras.

El objetivo de los sistemas expertos consiste en encontrar la mejor solución existente o solución óptima a un problema dado. Si el problema no es complejo, existen técnicas sistemáticas como Branch and Bound, Branch and Cut, etc. Generalmente en los problemas reales hay un amplio espacio de búsqueda, condición por la cual a medida que el espacio de búsqueda aumenta, el coste de ejecución de dichos algoritmos puede aumentar de forma exponencial, convirtiendo a estas técnicas de resolución en inviables prácticamente. Por esta razón surge otra posibilidad para afrontar este tipo de problemas, que consiste en buscar una solución aceptable en un tiempo razonable, e incluso la solución óptima al problema.

Para la resolución de problemas, existen multitud de algoritmos meta-heurísticos que resuelven este tipo de problemas computacionales de manera general, usando parámetros dados por el usuario sobre unos procedimientos genéricos y abstractos de una manera que se espera que ésta sea eficiente.

Las meta-heurísticas suelen ser aplicadas cuando no se tienen un algoritmo o heurística específica que dé una solución satisfactoria o bien cuando no es posible implementar ese método óptimo, y en algunos problemas suelen ser menos eficientes que las heurísticas específicas.

Las meta-heurísticas disponibles son tantas y tan variadas, que es prácticamente imposible ponerse de acuerdo en una forma de clasificarlas que sea universalmente aceptada.

En la actualidad, las heurísticas utilizan diversos métodos de funcionamiento, algunas aplican *métodos constructivos*, dado que en la búsqueda de una solución, se añaden paulatinamente componentes individuales a la solución, hasta alcanzar una solución factible. Otros aplican *métodos de descomposición*, los cuales tratan de dividir un problema en subproblemas más pequeños, siendo la salida de uno la entrada de su siguiente, de forma que la solución de los subproblemas conforman la solución del problema final. Existen heurísticas que aplican *métodos de reducción*, estos métodos identifican algunas características que se presumen óptimas y por tanto reducen o simplifican la complejidad del problema. También existen



heurísticas que plantean *métodos de modificación* del modelo, para simplificar la resolución. Por último, los más aplicados y conocidos son los *métodos de búsqueda por entornos*, los cuales parten de una solución factible inicial, y realizan alteraciones de esta solución de forma iterativa, hasta un criterio de parada que asegura una solución factible mejor.

En las figuras 4.21 y 4.20 se puede observar una clasificación taxonómica con un grupo importante de las múltiples meta-heurísticas existentes, y a continuación se presentarán algunas de las meta-heurísticas más importantes, de estas se derivan diversas variantes e incluso adaptaciones conjuntas de varias de estas técnicas algorítmicas.

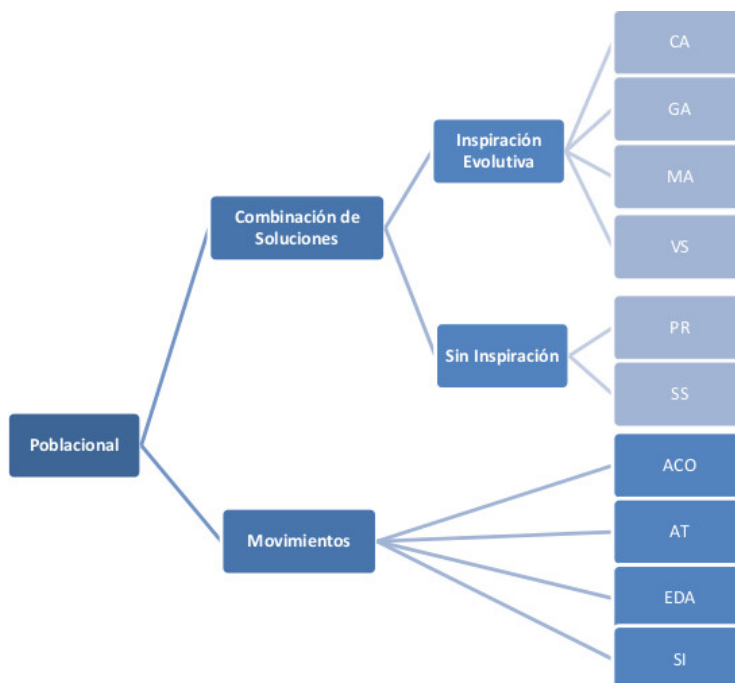
Nombre de las heurísticas de la clasificación taxonómica:

- ACO: *Ant Colony Optimization* - Optimización basada en colonias de hormigas.
- AMS: *Adaptive Multi-Start* - Multi-arranque adaptativo.
- AT: *Asynchronous Teams* - Equipos asíncronos
- CA: *Cultural Algorithms* - Algoritmos culturales.
- EDA: *Estimation Distribution Algorithms* - Algoritmos de estimación de la distribución.
- FANS: *Fuzzy Adaptive Neighborhood Search* - Búsqueda de vecindad adaptativa difusa.
- GA: *Genetic Algorithms* - Algoritmos genéticos.
- GLS: *Guided Local Search* - Búsqueda local guiada.
- GRASP: *Greedy Randomize Adaptive Search Procedures* - Procedimientos de búsqueda codiciosos, aleatorios y adaptativos.
- HC: *Heuristic Concentration* - Concentración heurística.
- ILS: *Iterated Local Search* - Búsqueda local iterativa.
- MA: *Memetic Algorithms* - Algoritmos meméticos.

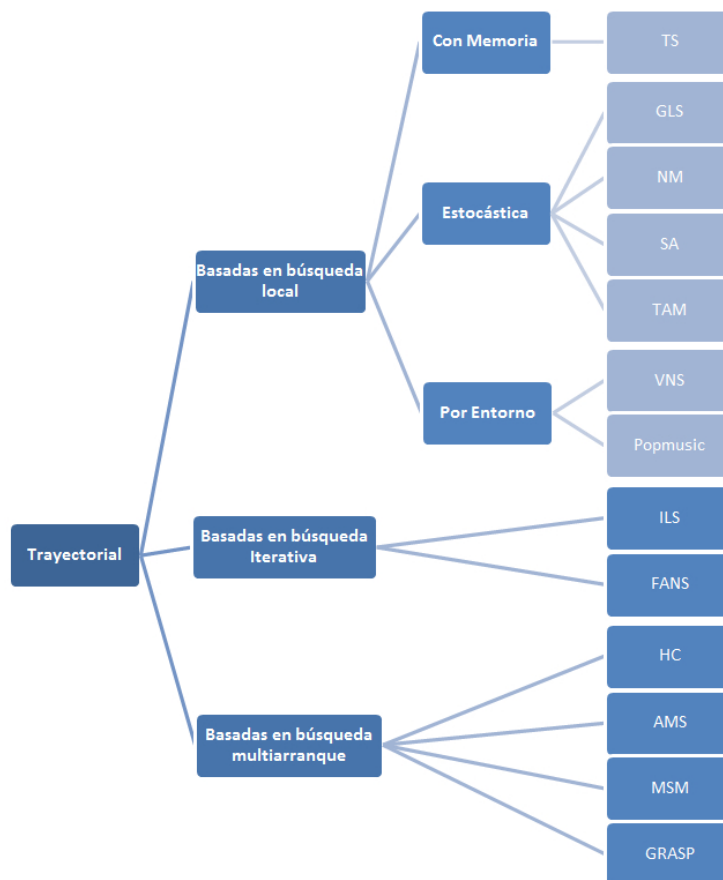
#### 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

- NM: *Noising Methods* - Métodos ruidosos.
- MSM: *Multi-Start Methods* - Métodos multi-arranque.
- PR: *Path Relinking*.
- SA: *Simulated Annealing* - Recocido simulado.
- SI: *Swarm Intelligence* - Inteligencia de enjambre.
- SS: *Scatter Search* - Búsqueda dispersa.
- TAM: *Threshold Accepting Methods* - Método de aceptación del umbral.
- TS: *Tabú Search* - Búsqueda Tabú.
- VNS: *Variable Neighborhood Search* - Búsqueda de vecindad variable.
- VS: *Viral System* - Sistemas Víricos.



**Figura 4.20:** Metaheurísticas basadas en población.



**Figura 4.21:** Metaheurísticas basadas en trayectoria.

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

### 4.5.1 Meta-heurísticas basadas en la trayectoria

En esta breve sección se repasarán algunas de las meta-heurísticas existentes basadas en la trayectoria. Se tratan de métodos, que comienzan con una solución de partida, y mediante la exploración de un vecindario, van actualizando su solución actual hasta encontrar el óptimo, como si construyeran una trayectoria de desplazamiento para la búsqueda de la mejor solución. Estos tipos de meta-heurísticas gozan de mecanismos con los cuales se busca escapar de soluciones óptimas locales. La finalización de estos algoritmos, suele relacionarse al alcance de un máximo número de iteraciones, o a un número máximo de iteraciones sin encontrar mejora (estancamiento de la búsqueda).

#### 4.5.1.1 Recocido simulado

El recocido simulado o *Simulated Annealing* (SA), es una de las técnicas más antiguas entre las meta-heurísticas y posiblemente es el primer algoritmo con una estrategia explícita para escapar de los mínimos locales. La idea del SA es simular el proceso de enfriamiento del metal y del cristal. El SA fue presentado por [Kirkpatrick et al., 1983] como algoritmo que evitaba quedar atrapado en óptimos locales, para ello el algoritmo en cada iteración permite encontrar una solución mejor que la actual. En cada iteración el algoritmo genera una solución vecina a la solución actual, si esta solución es mejor, entonces esta es aceptada con una determinada probabilidad que depende del valor de una variable denominada temperatura, que se incrementa en los momentos finales del algoritmo para que tome sólo soluciones buenas (más locales).

#### 4.5.1.2 Búsqueda tabú

La búsqueda tabú o *Tabu Search* (TS) es una de las meta-heurísticas con más éxito en la resolución de problemas de optimización combinatoria [Glover y Laguna, 1998]. La búsqueda tabú se basa en el uso de un explícito historial de búsqueda que ejerce de memoria a corto plazo, y que sirve tanto para escapar de los mínimos locales como para implementar una estrategia de exploración que evite buscar varias veces en la misma región de soluciones. Esta memoria a corto plazo o lista tabú, mantiene un registro de las soluciones visitadas más recientemente, y son excluidas

de los próximos movimientos. En cada iteración se elige la mejor solución entre las permitidas y la elegida es añadida a la lista tabú. Realmente se suelen almacenar los movimientos que han llevado al algoritmo a generar esa solución, por ser más eficiente. Existen variantes de esta meta-heurística que permiten incluir una solución incluso si está prohibida por a la lista tabú, para ello, se aplica un criterio de aspiración que permite soluciones que sea mejores que la mejor solución encontrada hasta el momento.

La lista tabú almacena soluciones completas en pequeñas cantidades, y compara cada solución con las que hay en la lista, pese a que es muy costoso computacionalmente. Este algoritmo solo almacena información sobre el pasado reciente. La búsqueda tabú almacena los últimos movimientos, donde un movimiento es una operación por medio de la cual se alcanza una solución vecina a partir de la solución actual.

Este almacenamiento que realiza el algoritmo tabú, define una memoria adaptativa que involucra las estrategias que permiten conservar los valores durante un tiempo, este periodo puede resultar útil para tomar decisiones, en esta memoria se seleccionan soluciones que también se pueden utilizar para realizar un olvido estratégico de las soluciones que convengan, además de conservar los mejores movimientos en una lista para que no puedan volver a ser utilizados en un período de tiempo (lista Tabú) lo que obligaría al algoritmo a buscar otras soluciones o también conservar los valores que más frecuentemente han cambiado en la búsqueda, para ver su comportamiento y obtener otros resultados a partir de estos.

La exploración sensible, en cambio, corresponde a diversas estrategias para mejorar las búsquedas, pero enfocadas a la exploración de otros espacios de soluciones (entornos) en los que exista la posibilidad de encontrar mejores soluciones. Estas estrategias podrían ser, por ejemplo, la intensificación de la búsqueda en diversos espacios de soluciones, o el manejo de niveles de aspiración en las soluciones obtenidas, o la exploración de nuevas regiones prometedoras (proceso de diversificación).

La estructura del algoritmo, al igual que otros algoritmos, parte de una solución inicial rápida o algoritmo de búsqueda local, que genera un punto inicial de búsqueda algorítmica, que satisface las restricciones del problema.

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

Obtenida la **solución inicial**, se genera en cada iteración, una nueva solución. Para llegar a esta nueva solución en cada iteración, se mueve de posición o intercambia un elemento de trabajo de la solución inicial (movimiento) para generar diversas combinaciones (vecindad) y luego se evalúa cada una de estas combinaciones con la función objetivo, de tal manera que se escoja la mejor solución en esa iteración. Una buena solución inicial podría acelerar la búsqueda con el consiguiente ahorro de tiempo. Dicha solución puede ser generada aleatoriamente o utilizando funciones que incorporan información adicional del problema o estrategias para generar puntos de mejor calidad.

La solución generada en cada iteración es el nuevo punto de partida para la siguiente iteración, de forma que a partir de esta solución se generará otra y así sucesivamente.

El **movimiento** es un procedimiento aleatorio o determinístico por el que se genera una solución admisible a partir de la solución inicial. Permite movimientos de empeoramiento para escapar de los óptimos locales de un problema mediante el uso de listas tabú y la exploración de zonas del espacio de búsqueda que no han sido exploradas. Cada movimiento que genera una solución dentro de una iteración, es colocado en una estructura de memoria o lista Tabú, debido a que los elementos que se colocan en esta lista no pueden ser considerados en las próximas iteraciones, obligando de esta manera a encontrar nuevas soluciones diferentes a las anteriores.

En cada iteración se guarda información acerca de los movimientos realizados, de tal manera que pueda poseer información de la región que se ha explorado, y así poder buscar en otras regiones con el fin de encontrar mejores soluciones. Las regiones exploradas, son los elementos vecinos de una solución parcial, esta **vecindad** es el conjunto de todas las soluciones admisibles que pueden ser generadas por la ejecución de un movimiento sobre la solución actual. Esto permite intensificar la búsqueda explorando espacios prometedores que contienen buenas soluciones ya exploradas parcialmente, y diversificar la búsqueda visitando nuevas zonas no exploradas.

Esta forma de búsqueda permite dirigir el algoritmo hacia buenas soluciones, aunque no se pueda asegurar que se encuentre la solución óptima.

La **lista Tabú**, es una memoria que contiene información de aquellos elementos que no pueden ser intercambiados en la búsqueda de la solución, sin embargo,

es una lista dinámica durante la ejecución del algoritmo. Estos elementos no permanecerán siempre, sino que eventualmente serán liberados para que puedan ser utilizados nuevamente. La lista tabú es un mecanismo de memoria adaptativa que trata de evitar que la búsqueda entre en un ciclo o quede atrapada en un óptimo local. Una vez que un movimiento, que genera una nueva solución, es aceptado, su movimiento se añade a la lista tabú y permanece en ésta un número determinado de iteraciones. Si el tamaño de la lista tabú es pequeño, entonces la búsqueda se intensifica en una determinada área del espacio, mientras que si el tamaño de la lista es grande se enfatiza la búsqueda en diferentes regiones del espacio de soluciones.

En general, la búsqueda finaliza después de un cierto número de iteraciones, después de un tiempo de ejecución predefinido, o cuando se alcanza un número dado de iteraciones sin mejorar la solución (criterio de parada). Además, la meta-heurística tabú cuenta con un criterio de aspiración o regla que invalida las restricciones tabú. Si un cierto movimiento se considera prohibido por las restricciones tabú, pero satisface el criterio de aspiración, entonces el movimiento puede ser considerado admisible.

En resumen 4.22, la meta-heurística comienza en una solución inicial. Usando un procedimiento para obtener soluciones vecinas, se genera un conjunto de movimientos candidatos y se evalúan sus correspondientes funciones objetivos. Si el mejor movimiento es tabú pero satisface el criterio de aspiración, se selecciona y pasa a ser la nueva solución actual. En otro caso, el mejor movimiento no tabú pasa a ser considerado la nueva solución actual. Se repite este procedimiento hasta que el criterio de parada se satisfaga, se considera mejor solución la encontrada hasta ese momento. El movimiento elegido en cada iteración es introducido en la lista tabú un número de iteraciones, para que similares soluciones no sean generadas de nuevo en posteriores iteraciones. El número de iteraciones de la lista tabú sugiere dos tipos de estrategias:

**Intensificación** Esta estrategia modifica las reglas de elección para favorecer la aparición de atributos que pertenecen a buenas soluciones encontradas. Regresa a regiones ya exploradas para estudiarlas más a fondo (lista tabú pequeña).

#### 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

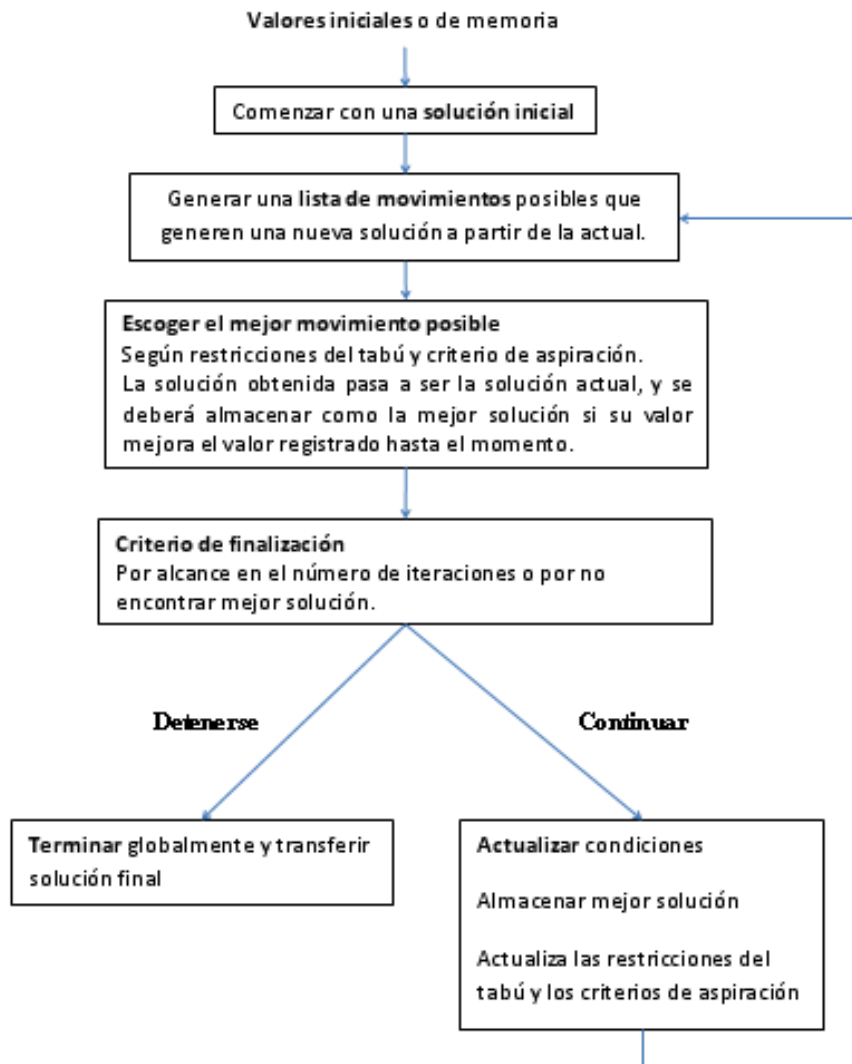


Figura 4.22: Esquema algoritmo tabú.



**Diversificación** Consiste en dirigir la búsqueda a regiones no exploradas del espacio de soluciones. Esta estrategia modifica las reglas de elección para incorporar a la solución atributos usados con poca frecuencia durante la búsqueda (lista tabú grande).

Esta técnica tiene varias ventajas:

- Es sencilla de implementar, con respecto a otras meta-heurísticas.
- Utiliza de manera “inteligente” la memoria para salir de óptimos locales.
- Lleva un registro histórico de las soluciones visitadas, las cuales pueden ser utilizadas posteriormente.
- Permite aplicar estrategias de intensificación y diversificación, para poder encontrar una mejor solución al buscar en un espacio de soluciones diferente.

Así mismo esta técnica tiene sus desventajas:

- La eficiencia depende principalmente de cómo esté modelado el problema.
- Al igual que en todas las técnicas heurísticas, no existe forma de saber que tan cerca está de la solución óptima.
- La función objetivo es clave en esta meta-heurística, pero no se puede saber si la función definida para un problema, es la óptima, por esta razón, la forma de plantear esta función objetivo es otro campo de estudio en esta meta-heurística.
- Las estrategias de intensificación y diversificación, también son materia de estudio, debido a que su eficiencia puede variar para cada problema.

A continuación se muestra el pseudocódigo utilizado para implementar el algoritmo tabú de una manera eficiente en la búsqueda de la mejor solución en un tiempo razonable.

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

Algoritmo Tabu

**Entrada:** Datos, Criterio de parada, Criterio de aspiración

Mejor solución =  $\emptyset$

Lista tabú =  $\emptyset$

Solución = generar solución inicial

**Mientras** no se cumpla el criterio de parada

Generar vecindad (Solución)

Evaluar función objetivo (Vecindad)

Mov. aceptado = Elegir movimiento(Lista tabú, Criterio de aspiración)

Actualizar lista tabú (Lista tabú, Mov. aceptado, Tamaño lista)

Solución actual = calcular nueva solución(Movimiento aceptado)

**Si** Valor(Solución actual) > Valor(Mejor solución) **entonces**

Mejor solución = Solución actual

**Fin si**

**Fin mientras**

### 4.5.1.3 GRASP

El procedimiento de búsqueda miope, aleatorio y adaptativo o *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) [Feo y Resende, 1995] es un procedimiento iterativo estructurado en dos fases. En primer lugar la construcción de una solución y en segundo lugar un proceso de mejora. En cada iteración se genera una solución mediante un método ávido-aleatorio, que se mejora mediante búsqueda local. Por tanto, la solución mejorada es el resultado de la realización de un proceso de búsqueda construida de manera aleatoria. Este proceso va añadiendo paso a paso diferentes componentes que generan una solución parcial, estos componentes que generan la solución parcial son elegidos aleatoriamente de una lista restringida de candidatos. Esta lista de candidatos se ordena de acuerdo a alguna función dependiente del problema y se compone de los mejores componentes aplicables para la búsqueda de la solución en función de un parámetro, el cual varía indicando el método de muestreo que transforma la búsqueda convirtiendo el algoritmo en aleatorio o en un voraz según su valor en esta primera fase. A partir de esta solución en una segunda fase se aplica un algoritmo de búsqueda local.

### 4.5.1.4 Búsqueda con vecindario variable

La búsqueda con vecindario variable o *Variable Neighborhood Search* (VNS) [Mladenovic y Hansen, 1997] y sus variantes son meta-heurísticas que se aplica explícitamente para cambiar entre diferentes vecindarios durante la búsqueda. Este algoritmo es muy general y con muchos grados de libertad a la hora de diseñar variaciones e instanciaciones particulares. El primer paso a realizar es definir un conjunto de vecindarios ya sea de forma aleatoria, o mediante complejas ecuaciones que se deducen a partir del problema a resolver. La iteración del algoritmo se divide en tres fases (selección de candidato, mejora y movimiento).

La primera fase es la elección del candidato, se elige un vecino de forma aleatoria del  $k$ -ésimo vecindario, y se usa como punto de partida en la segunda fase en la que se realiza una búsqueda local para la mejora de la solución. Al finalizar la búsqueda local o proceso de mejora, se compara la nueva solución con la original. Si la nueva solución es mejor, se convierte en la solución actual y se inicializa el contador de vecindarios ( $k=1$ ), si no es mejor, se repite el proceso pero utilizando el siguiente vecindario ( $k+1$ ). La búsqueda local es el paso de intensificación del método y el cambio de vecindario puede considerarse como el paso de diversificación.

### 4.5.1.5 Búsqueda local iterada

La búsqueda local iterada o *Iterated Local Search* (ILS) [Lourenço et al., 2003] es una meta-heurística basada en un concepto simple pero muy efectivo. En cada iteración, la solución actual es alterada y a esta nueva solución se le aplica un método de búsqueda local para mejorarla. Si la nueva solución pasa un test de aceptación, esta es la nueva solución actual. La alteración de la solución, es el punto de mayor interés del algoritmo, dado que si la alteración es pequeña, la solución no saldrá del entorno local, mientras que si es grande, se convertirá en un algoritmo local con reinicio aleatorio. El criterio de aceptación actúa como filtro de nuevas soluciones dependiendo de la historia de búsqueda y de las características del nuevo mínimo local.

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

### 4.5.1.6 Método con arranque múltiple

El método de búsqueda con arranque múltiple o *Multi-Start Methods* (MSM) [Martí, 2003] es una meta-heurística basada en realizar varias búsquedas monótonas partiendo de diferentes soluciones iniciales. Considerándose búsqueda monótona a cualquier búsqueda o meta-heurística aplicable, por ejemplo las descritas en los apartados anteriores. Una de las formas más simples de llevar esto a cabo consiste en generar una muestra de soluciones iniciales o de arranque. Esto es equivalente a generar al azar una nueva solución de partida cada vez que la búsqueda quede estancada en el entorno de una solución óptima local.

### 4.5.2 Meta-heurísticas basadas en población

Al igual que en el anterior apartado, en este se repasarán algunas de las meta-heurísticas existentes basadas en la población o conjuntos de soluciones. Se tratan de métodos, que se caracterizan por trabajar con un conjunto de soluciones en cada iteración, a diferencia de los métodos basados en trayectoria, que únicamente manipulan una solución del espacio de búsqueda por iteración.

#### 4.5.2.1 Algoritmos evolutivos

Los algoritmos evolutivos o *Evolutionary Algorithms* (EA) están inspirados en la teoría de la evolución natural. Esta familia de técnicas sigue un proceso iterativo y estocástico que opera sobre una población de soluciones denominadas individuos. En el ámbito de los algoritmos evolutivos, cabe destacar un nuevo enfoque para hacer frente a problemas combinatorios. Éste hace uso de una analogía biológica inspirada en el comportamiento de los virus, el algoritmo denominado sistema viral (VS, Viral Systems) [Cortés et al., 2008], éste presenta un mecanismo de replicación, así como los procesos de infección se utilizan para generar una metaheurística que permite la obtención de resultados valiosos. Inicialmente, la población es generada aleatoriamente o mediante alguna heurística alternativa. En cada iteración, la heurística realiza tres fases: selección, reproducción y reemplazo. Este proceso es repetido hasta que se cumple un cierto criterio de terminación (normalmente después de un número dado de iteraciones). En la primera fase, o fase de selección, se seleccionan generalmente los individuos más aptos de la población actual

para ser posteriormente recombinados en la fase de reproducción. Los individuos resultantes de la recombinación se alteran mediante una operación de mutación. Finalmente, a partir de la población actual y los mejores individuos generados se forma una nueva población, dando paso a la siguiente generación del algoritmo.

### 4.5.2.2 Algoritmos de estimación de la distribución

Los algoritmos de estimación de la distribución o *Estimation of Distribution Algorithms* (EDA) [Mühlenbein, 1997] constituyen una familia de meta-heurísticas derivadas de los algoritmos evolutivos. A diferencia de estos los EDA buscan estimar la distribución de probabilidad de cada variable. La población de soluciones candidatas se recrea en cada generación, a partir de la distribución de probabilidad obtenida a partir de los mejores individuos de la generación anterior. La población no se regenera a partir de individuos, sino de las distribuciones de probabilidad obtenidas, y a diferencia de las heurísticas evolutivas, no existen operadores de cruce ni de mutación.

### 4.5.2.3 Optimización basada en colonias de hormigas

Los algoritmos de optimización basados en colonias de hormigas o *Ant Colony Optimization* (ACO) [Cordón García et al., 2002] están inspirados en el comportamiento de las hormigas reales cuando buscan comida. El comportamiento de las colonias de hormigas en la búsqueda de su alimento se inicia con las hormigas explorando el área cercana a su nido de forma aleatoria. Tan pronto como una hormiga encuentra comida, la lleva al nido. Mientras que realiza este camino, la hormiga va depositando una sustancia química denominada feromona. Esta sustancia ayudará al resto de las hormigas a encontrar la comida. La comunicación indirecta entre las hormigas mediante el rastro de feromona las capacita para encontrar el camino más corto entre el nido y la comida. Este comportamiento es el que intenta simular este método para resolver problemas de optimización. La técnica se basa en dos fases, en una primera fase se realiza la construcción de una solución basada en el comportamiento de una hormiga y actualización de los rastros de feromona artificiales. El algoritmo no fija ninguna planificación o sincronización a priori entre las fases, pudiendo ser incluso realizadas simultáneamente.

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

### 4.5.2.4 Optimización basada en cúmulos de partículas

Los algoritmos de optimización basados en cúmulos de partículas o *Particle Swarm Optimization* (PSO) [Kennedy, 1999] están inspirados en el comportamiento social del vuelo de las bandadas de aves o el movimiento de los bancos de peces. El algoritmo PSO mantiene un conjunto de soluciones, también llamadas partículas, que son inicializadas aleatoriamente en el espacio de búsqueda. Cada partícula posee una posición y velocidad que cambia conforme avanza la búsqueda. El movimiento de una partícula incluye su velocidad y las posiciones donde la propia partícula, junto con las partículas de su vecindario encuentran buenas soluciones. En el contexto de PSO, el vecindario de una partícula se define como un conjunto de partículas del cúmulo. El vecindario de una partícula puede ser global, en el cual todas las partículas del cúmulo se consideran vecinas, o local, en el que sólo las partículas más cercanas se consideran vecinas.

### 4.5.2.5 Búsqueda dispersa

La búsqueda dispersa o *Scatter Search* (SS) [Glover, 1998] es una meta-heurística que mantiene un conjunto relativamente pequeño de soluciones experimentales (llamadas conjunto de referencia o *RefSet*) que se caracteriza por contener soluciones diversa y de calidad (por ser distantes en el espacio de búsqueda). Para la definición completa de SS hay que concretar cinco componentes: creación de la población inicial, generación del conjunto de referencia, generación de subconjuntos de soluciones, método de combinación de soluciones y método de mejora.

### 4.5.2.6 Búsqueda por re-encadenamiento de camino

El re-encadenamiento de camino o *Path Relinking* (PR) [Glover, 1998] es una meta-heurística asociada a la búsqueda dispersa que utiliza la información que se obtiene de las mejores soluciones. Esta información se aprovecha en el perfeccionamiento de otras soluciones que se encuentran posteriormente. Fundamentalmente se trata de generar soluciones explorando las trayectorias que conectan soluciones de alta calidad. Partiendo de una de estas soluciones se genera un camino de soluciones hacia la otra solución incorporando a la primera atributos de la segunda. Este camino se construye tomando cada vez el atributo de la segunda solución que lo hace

más cercano a ella. A continuación se toman, como puntos de arranque para nuevas fases de mejora, una o varias de las soluciones del recorrido anterior.

### 4.5.3 Algoritmo genético

Los algoritmos genéticos o *Genetic Algorithms* (GA) [Holland, 1992] son una de las técnicas más aplicadas en los SE. Se trata de un algoritmo de los denominados bioinspirados, basado en las teorías de Darwin respecto a la reproducción y supervivencia de los individuos más aptos.

#### Introducción

El algoritmo clásico, se basa en mantener una población de soluciones candidatas que codifica un determinado problema de optimización. Las soluciones iniciales son generalmente creadas ya sea al azar o por una heurística de construcción simple. Durante la ejecución del algoritmo, un proceso de selección estocástica se encarga de elegir las mejores soluciones, es decir, aquellas con mayor probabilidad. La selección se emplea para obtener un conjunto de padres, después se produce una nueva generación de soluciones candidatas, mediante la recombinación entre los padres y mutaciones de la descendencia. Durante esta recombinación, se generan nuevas soluciones con propiedades (información genética) que figura en los padres. La mutación normalmente se realiza mediante pequeñas modificaciones al azar.

Los algoritmos genéticos clásicos se basan en un principio básico de la evolución: los mejores individuos tienen una mayor probabilidad de reproducirse y sobrevivir que otros individuos menos adaptados al entorno.

Para implementar este principio, los algoritmos genéticos mantienen una población que evoluciona a través del tiempo y que al final converge a una única solución. Los individuos de la población se representan mediante un cromosoma que codifica las variables del problema que se quiere resolver. Normalmente se utiliza uno o varios cromosomas simples compuestos por una cadena de bits de longitud fija o variable. Cada individuo mide la calidad de la solución en base a una función de coste. Esta le permite simular el concepto de individuo mejor adaptado.

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

Aquellos individuos cuyo valor de la función de coste sea mejor, tendrán más posibilidades de ser seleccionados para construir la siguiente población, y por tanto, para pasar sus propiedades a los individuos de la siguiente generación.

Para implementar un algoritmo genético es necesario definir:

- Una función de coste que evalúe a los individuos (fitness).
- Una codificación que permita representar las soluciones.
- Los operadores de selección, cruce y mutación.
- El tamaño de la población.
- Los valores de las probabilidades con la que se aplican cada uno de los operadores.

El algoritmo comienza con una solución inicial. Obtenidos los individuos iniciales, se repite un proceso hasta cierta condición de parada que puede ser un número máximo de generaciones, la convergencia de la población, etc. Dicho proceso comienza evaluando la población y seleccionando los individuos que intervendrán en la formación de la siguiente generación. Seguidamente se aplican los operadores de cruce y mutación y se obtiene la nueva población a partir de la que se repiten los mismos pasos para ir avanzando en el proceso de búsqueda.

### **Codificación, mutación y cruce**

En esta técnica, las posibles soluciones del problema (individuos), pueden representarse como un conjunto de parámetros (genes), los cuales son agrupados formando una fila de valores (cromosoma). Cada valor se representa mediante un alfabeto, en el caso más básico se usa el binario  $[0,1]$ .

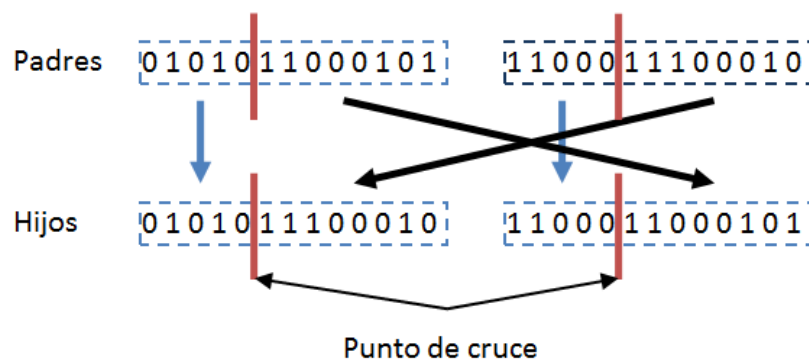
El conjunto de parámetros representa un cromosoma particular que los biólogos denominan fenotipo. El fenotipo contiene la información requerida para construir un organismo (genotipo). La adaptación al problema de un individuo depende de la evaluación del genotipo, mediante el uso de una función objetivo (de evaluación o adaptación) sobre los cromosomas, ésta debe ser diseñada para cada problema de manera específica. De forma que, dado un cromosoma particular, la función de



adaptación le asigna un número, que se considera que refleja el nivel de adaptación al problema del individuo representado por el cromosoma.

Durante la fase reproductiva se seleccionan los individuos de la población para cruzarse y producir descendientes. Una vez mutados estos constituirán la siguiente generación de individuos. La selección de padres se efectúa al azar usando un procedimiento que favorezca a los individuos mejor adaptados, ya que a cada individuo se le asigna una probabilidad de ser seleccionado que es proporcional a su función de adaptación. Esto permite que los individuos bien adaptados se elijan probablemente varias veces por generación, mientras que los pobremente adaptados al problema, no se escogerán más de vez en cuando.

Una vez seleccionados dos padres, sus cromosomas se combinan, utilizando habitualmente los operadores de cruce y mutación.



**Figura 4.23:** Ejemplo de cruce de cromosomas.

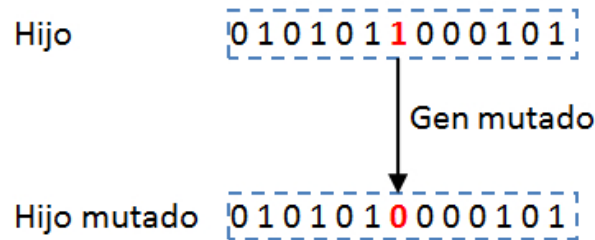
El operador de cruce (ejemplo en figura 4.23), coge dos padres seleccionados y corta sus filas de cromosomas en una posición escogida al azar, para producir dos sub-lista iniciales y dos sub-listas finales. Después se intercambian las sub-listas finales, produciéndose dos nuevos cromosomas completos.

Ambos descendientes heredan genes de cada uno de los padres. Este operador se conoce como operador de cruce basado en un punto. Habitualmente el operador de cruce no se aplica a todos los pares de individuos que han sido seleccionados para emparejarse, sino que se aplica de manera aleatoria.

El operador de mutación (ejemplo en figura 4.24) se aplica a cada hijo de manera individual, y consiste en la alteración aleatoria (normalmente con probabilidad

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---



**Figura 4.24:** Ejemplo de mutación de cromosomas.

pequeña) de cada gen componente del cromosoma.

### Algoritmo clásico

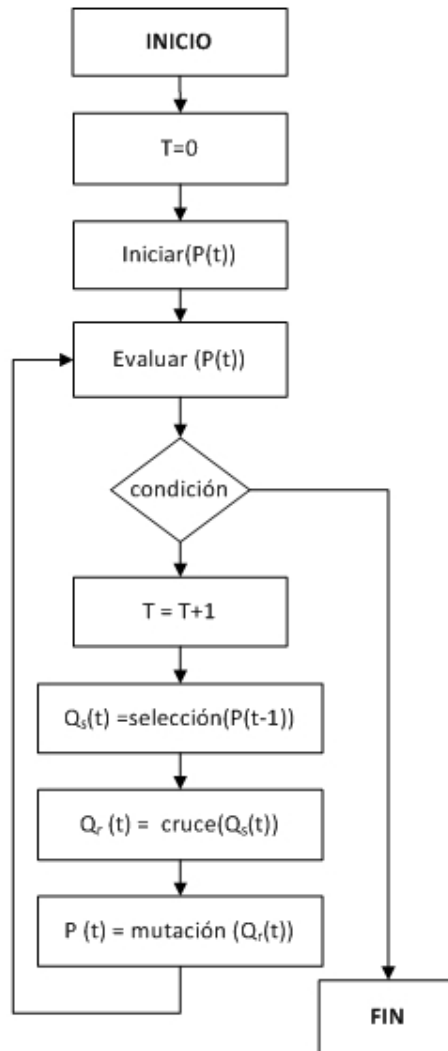
Finalmente el algoritmo clásico atiende al diagrama de la figura 4.25.

Esta técnica ha demostrado su eficacia en los problemas de optimización. Aunque, no es apropiada para la resolución de cualquier tipo de problema. Según [Coello, 1995], se recomienda en general tener en cuenta las siguientes características antes de intentar aplicar el algoritmo a un problema:

- El espacio de búsqueda (posibles soluciones) debe estar delimitado dentro de un cierto rango.
- Se debe poder definir una función de coste u objetivo que indique la bondad de la solución.
- Las soluciones se deben poder codificar de una forma que resulte relativamente fácil de implementar.

### Otras técnicas

El algoritmo clásico fue introducido por [Holland, 1975], pero en esta rama de la investigación se encuentran también las denominadas estrategias evolutivas y la computación evolutiva. Las diferencias entre estas otras técnicas es, la manera cómo las soluciones de candidatos están representadas, y cómo la selección, recombinación y mutación se aplican realmente. Mientras que en el algoritmo clásico las



**Figura 4.25:** Algoritmo genético [Holland, 1975].

soluciones se codificaron a menudo como vectores binarios, la estrategia se desarrolló hacia valores reales, la computación evolutiva evolucionó en cambio al uso de máquinas de estados finitos para representar las soluciones.

Una cuarta clase, la programación genética, fue popularizada por [Koza, 1994]. En éste caso, las soluciones candidatas son las estructuras de árbol que representan los programas. Por supuesto, las soluciones se deben representar en la forma que mejor se adapte al problema en cuestión.

Hay varias ventajas para los algoritmos evolutivos respecto a otras técnicas de

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

resolución. Los algoritmos evolutivos son simples, no requieren ningún conocimiento matemático en profundidad, por lo que son relativamente baratos y rápidos de implementar. Además, estos son abiertos a los cambios del problema y pueden, en general, hacer frente a restricciones adicionales, inexactitudes, etc.

Por supuesto, estos algoritmos no pueden competir con algoritmos de optimización específicos respecto de un problema. Esto llevó al desarrollo de muchos métodos híbridos, que combinaban los algoritmos evolutivos con operadores específicos del problema, codificaciones “inteligentes”, mejoras inteligentes a nivel local o algoritmos de reparación [Raidl, 2005]. La importancia de esta técnica radica en la posibilidad de combinar de forma eficaz los algoritmos evolutivos con otras técnicas.

### **Programación genética**

En la programación genética se busca que poblaciones de programas evolucionen, transmitiendo su herencia de manera que se adapten mejor al medio. Para ello se realiza un proceso de búsqueda sobre un espacio que utiliza como población una estructura formada por un conjunto ordenado de forma jerárquica (estructura de árbol). Dichos programas se construyen a partir de un conjunto predefinido de funciones que cambian a lo largo del proceso.

Esta técnica, que se fundamenta en los algoritmos genéticos, fue concebida por John Koza, que en su empeño investigador ha conseguido desarrollar una máquina con capacidad inventiva. Se trata de un artefacto que puede realizar en paralelo hasta 1.000 procesamientos, a partir de los cuales genera inventos patentables. Uno de los más destacados ha sido una antena que ya ha sido utilizada por la NASA en uno de sus micro-satélites experimentales, y que se ha convertido en el primer objeto ideado artificialmente para ser lanzado al espacio [Keats, 2006].

La técnica tiene como objetivo lograr que los ordenadores aprendan a resolver problemas, con programas que evolucionan hasta alcanzar soluciones propias y satisfactorias, como hace el pensamiento humano y, sobre todo, la biología.

### 4.6 Sistemas multi-agentes

La organización de la información de muchos sistemas suele tener procesos que involucran varios sistemas o personas con motivaciones, conocimiento y responsabilidades diferentes respecto a las partes del sistema, aunque con un objetivo común. Ésta última metodología tiene un carácter flexible, modular y distribuido que permite su aplicación en cualquier sistema complejo, y por supuesto es un campo de investigación abierto en lo que respecta a los HVAC en edificios, pues en estos encontramos una baja aplicación de esta metodología. Aun así, los MAS enlazan múltiples tecnologías, técnicas y disciplinas [Luck et al., 2003].

#### 4.6.1 Introducción

En esta última década, el mundo ha sido testigo de una explosión tecnológica que ha afectado al rendimiento de los equipos y las comunicaciones. El desarrollo de las redes de información ha supuesto una revolución en los desarrollos y la integración de los sistemas. La computación basada en agentes es un nuevo paradigma que nace con las nuevas tecnologías de la información y comunicación que en gran medida proporciona apoyo técnico-tecnológico. Muchas disciplinas científicas y de ingeniería están utilizando actualmente los agentes.

La industria de los sistemas aplicados a los edificios inteligentes también ha observado la utilidad de los agentes. Aunque su aplicación se ha desarrollado en menor medida, gracias a las propiedades de éstos (autónomos, distribuidos, abiertos, flexibles, con capacidad de respuesta y redundancia) podrían resolverse algunas de las complejidades que hay en los sistemas inteligentes de los edificios: su adaptabilidad a los cambios e interrupciones, la inteligencia, la posibilidad de configuración para algunos tipos de actividad social, etc. pueden ayudar en la reacción a las perturbaciones que ocurren en los ambientes interiores de los edificios. Por lo tanto, muchas de las tareas asociadas a las decisiones de confort de un edificio podría ser llevada a cabo por los agentes, ya sean pequeños o grandes, simple o sofisticado, de grano fino o grueso, etc. este paradigma habilita y capacita a los agentes para comunicarse y cooperar entre sí, lo cual es para los sistemas aplicados a estos edificios uno de los mayores retos.

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

Los sistemas basados en agentes, son una de las ramas de investigación más actuales, los agentes y sistemas multiagentes están siendo aplicados a multitud de problemas, y están relacionados con diferentes tecnologías, tendencias, técnicas y disciplinas.

### 4.6.2 ¿Qué son los Agentes?

No existe una definición ampliamente aceptada por la comunidad, pues cada autor ha adoptado una perspectiva favorable a su interés. No obstante, en el devenir de definiciones y justificaciones, hay una afirmación que resaltar por la realidad que transmite: “Los agentes inteligentes son un noventa y nueve por ciento informática y un uno por ciento Inteligencia Artificial” [Etzioni, 1996]. Esta afirmación permite definir al agente como una herramienta de abstracción, que facilita el desarrollo de sistemas complejos y distribuidos mediante esta técnica.

Una definición general de agente sería: “Un agente es un sistema computacional que está situado en un entorno dinámico y es capaz de exhibir un comportamiento autónomo e inteligente”. Posiblemente la definición más aceptable es la realizada por [Wooldridge y Jennings, 1995] que aplica el término agente al sistema informático que tiene las siguientes propiedades:

**Autonomía** Los agentes operan sin intervención humana y tienen cierto control sobre sus acciones y su estado interno.

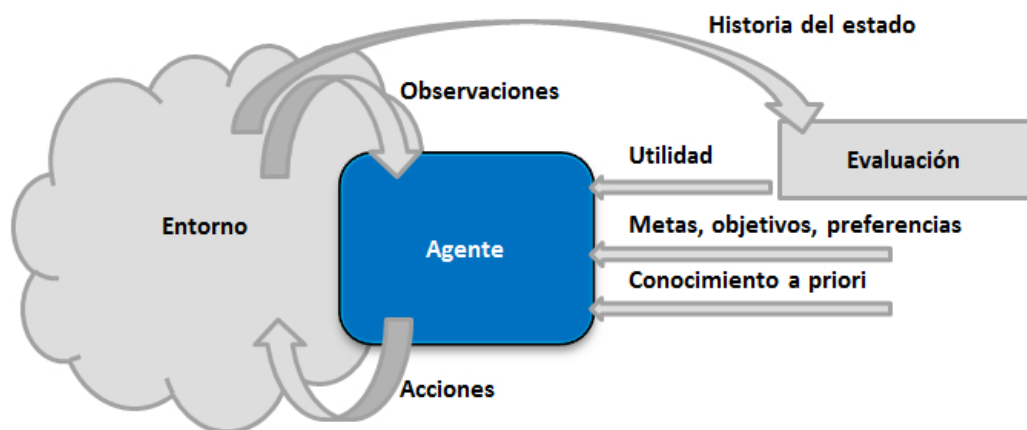
**Capacidad social** Los agentes son capaces de interaccionar con otros agentes (o seres humanos) mediante el empleo de un lenguaje de comunicación entre agentes.

**Reactividad** Los agentes perciben directamente su entorno y responden a los cambios que se producen en él.

**Pro-actividad** Los agentes no sólo se limitan a responder a cambios en su entorno, sino también han de ser capaces de tomar la iniciativa y su comportamiento debe estar motivado por la consecución de sus objetivos.

Existen tantas definiciones de agentes y tan variadas como tipos, aun así, un agente:

- Opera en un entorno (un espacio).
- Hace observaciones sobre su entorno con los cuales genera y mantiene sus propios conocimientos y creencias.
- Tiene preferencias respecto a los estados del entorno.
- Inicia y ejecuta las acciones para el cambio del entorno en base a sus metas, objetivos y preferencias, a conocimientos anteriores y a nuevos conocimientos que son generados y utilizados gracias a la evaluación del entorno.
- Los agentes operan sólo en entornos conocidos, que son observables y predecibles.



**Figura 4.26:** Agente [Russell y Norvig, 2010].

La autonomía de los agentes les permite tomar sus propias decisiones, lo que les confiere una capacidad de maximizar sus propios objetivos y metas respecto de sus conocimientos del entorno local en el que se mueven.

Tras conocer el término, cabe preguntarnos si son los agentes SE, para [Wooldrige, 1997] la diferencia reside en que los SE son inherentemente incorpóreos, es decir, que no son forzados necesariamente a interactuar directamente con su entorno, sino que precisan de un intermediario. Además, a los SE no se les requiere que actúen en tiempo real con otros SE, sin embargo existen algunos SE que sí presentan esas condiciones, lo que les hace muy parecidos a los agentes. Para solventar

#### 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

la cuestión, se puede decir que un agente puede ser implementado empleando un SE o no, si bien no siempre un SE reúne las condiciones necesarias para poder ser considerado agente.

Comúnmente se suele decir que un agente comprende las siguientes características:

- El **propósito** de los agentes a la hora de actuar es el propósito de su diseñador o el usuario al que representan.
- A fin de cumplir con uno o varios propósitos en particular, los agentes son **autónomos** en el sentido de que controlan tanto su estado interno como su comportamiento en el entorno.
- Los agentes presentan algún tipo de **inteligencia**, mediante la aplicación de reglas fijas para el razonamiento y la planificación o mediante el desarrollo de capacidades de aprendizaje.
- Los agentes **interactúan** con su entorno, y en una comunidad, con otros agentes.
- Los agentes son perfectamente **adaptables**, es decir, son capaces de adaptar su comportamiento a los cambios del entorno sin la intervención de su diseñador.

Otras propiedades de los agentes son:

- La **movilidad**, es la capacidad de transportarse a otro entorno para tener acceso a recursos remotos o para responder a otros agentes.
- La **originalidad** o autenticidad, la identidad de los agentes es única y su propio aprendizaje lo hace diferente de cualquier agente.
- La **transparencia** y la **credibilidad** o fiabilidad, los agentes no comunican información falsa de manera deliberada.



Pese a todas estas propiedades, los agentes normalmente tienen poco conocimiento y éste suele ser incompleto. Además, las capacidades de razonamiento y sus recursos suelen ser limitados.

El entorno de un agente influye en éste, pues en la mayoría de los casos el agente sólo controlará parte del entorno. Los entornos son no deterministas, es decir, una misma acción realizada por el mismo agente en situaciones diferentes puede tener efectos muy distintos. Un agente debe estar preparado para fallar o para la incertidumbre de no saber si ha tenido éxito o no. El principal problema al que se enfrenta un agente es decidir qué acción realizar para alcanzar sus objetivos de diseño, para esto, dispone de un repertorio de acciones disponibles con sus correspondientes precondiciones.

Un agente puede tener un conocimiento explícito de cómo sus acciones pueden cambiar el entorno, para ello la inteligencia artificial (IA) proporciona una serie de métodos de planificación para la resolución de acciones en ciertos ámbitos de la vida real en los que se han demostrado que se pueden aplicar diversos tipos de resolución de problemas, incluyendo la búsqueda, el razonamiento, la planificación y el aprendizaje. Se pueden utilizar diferentes formas de llegar a una solución a partir de diversas técnicas como son las teorías de decisión, tanto clásicas como cuantitativas, así como el conocimiento basado en BDI (*Beliefs-Desires-Intentions*). El BDI es el modelo que mejor expresa el conocimiento de un agente sobre el entorno. Debido a que este modelo asume que el agente tiene conocimientos ciertos e inciertos.

- B-Beliefs, creencias: son los estados que se quieren lograr y están marcados en base a unos objetivos.
- D-Desires, deseos: son los estados preferidos a largo plazo.
- I-Intentions, intenciones: representan los compromisos que el agente tomó anteriormente. Son las decisiones del pasado realizadas para un plan que aún no se ha completado.

El modelo BDI se usa para describir el estado cognitivo de un agente, es decir es un modelo para procesar información a partir de la percepción, el conocimiento ad-

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

quirido (experiencia) y características subjetivas que permiten valorar y considerar ciertos aspectos en detrimento de otros.

Los agentes tienen diversos comportamientos según su diseño. Por sus acciones se pueden decir que son:

- Reactivos: perciben el entorno y responden ante cambios.
- Deliberativos o proactivos: son los agentes los que toman la iniciativa.
- Habilidades sociales: interaccionan con otros agentes.



**Figura 4.27:** Características de los agentes.

### 4.6.3 Sistemas multi-agentes

Los Sistemas Multi-Agentes (MAS) están formados por una red de agentes que interactúan y se comunican entre sí. Un sistema multi-agente está formado por:

- Un entorno.
- Un conjunto de objetos integrados con el entorno. Los objetos son pasivos, pueden ser percibidos, creados, destruidos y modificados por los agentes.
- Un conjunto de agentes u objetos especiales que representan las entidades activas del sistema.

- Un conjunto de relaciones que unen objetos y agentes.
- Un conjunto de operaciones que hacen posible que los agentes perciban, produzcan, consuman, transformen y manipulen objetos.
- Operadores que representan la aplicación de operaciones sobre el mundo y la reacción de éste al ser alterado. Estos operadores se pueden entender como leyes del universo.

En estos sistemas, el conocimiento de dos agentes sobre un mismo aspecto no tiene por qué ser proporcional y puede tener diferentes representaciones en cada uno de los agentes.

### 4.6.4 Coordinación, colaboración y cooperación

Los edificios inteligentes tienen una naturaleza dinámica que requiere que los agentes cumplan determinadas características, no sólo que sean proactivos y reactivos, sino también que tengan la capacidad de respuesta, que sólo se puede lograr si los agentes están autorizados a modificar sus compromisos de forma dinámica.

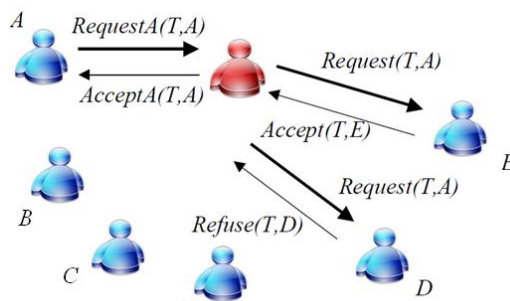
En estos entornos no se usan modelos basados en la lógica como el BDI, sino que se considera el MAS como una esfera de compromisos que encapsula las promesas y las obligaciones que los agentes pueden tener entre ellos.

Coordinación, Colaboración y Cooperación; las 3C's conforman los aspectos especiales que han de ser realizados a lo largo de la organización funcional de los sistemas, por ejemplo en edificio. En éstos las funciones de más alto nivel pueden ser: la planificación de la demanda, la planificación general, la capacidad de planificación, etc. y las de más bajo nivel: el control de las salas y el seguimiento responsable de la ejecución de los planes detallados. Todos estos elementos son esenciales en cualquier sistema. Aunque no se puede olvidar que el pilar más importante lo conforma la comunicación que permite trabajar entre los agentes. En la figura 4.28 se observa un ejemplo de comunicación.

Debido a la interacción de los MAS, éstos puede resolver problemas que están más allá de los límites o de las competencias de los agentes como entes individuales. La coordinación para decidir que hay que hacer a partir de acciones entre agentes es necesaria. Estos modelos de coordinación proporcionan los medios de

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---



**Figura 4.28:** Comunicación entre agentes.

comunicación y normas para la gestión de las interacciones y dependencias de los agentes. La coordinación requiere un caudal regulado de información entre el agente y el ambiente que rodea su entorno, para ello existen diferentes lenguajes con sus propias sintaxis y semánticas que permiten la comunicación.

Los dos lenguajes más conocidos en la literatura son:

- KQML (Knowledge Query Manipulation Language)
- FIPA ACL (Agent Communication Language)

La colaboración significa la realización de actividades concertadas con el fin de lograr objetivos compartidos. En la literatura de los MAS, existen diversidad de patrones de organización como son: independencia, colaboración simple, obstrucción, colaboración coordinada, competición individual pura, competición colectiva pura, conflictos individuales sobre recursos o conflictos colectivos sobre recursos.

La **habilidad social**, es la habilidad que permite que los agentes colaboren e interactúen entre ellos dentro de un MAS, para lo que se requiere:

**Interacción** diálogo.

**Delegación** asignación de las tareas a realizar.

**Cooperación** capacidad de trabajar con el fin de lograr un objetivo común.

**Coordinación** capacidad para organizar el proceso que soluciona el problema de forma que se eviten las interacciones nocivas y que se exploten las beneficiosas.

**Negociación** capacidad para formular acuerdos que sean aceptables por todas las partes implicadas para permitir la colaboración y la organización entre ellos.

Las metas en cualquier actividad son alcanzadas por la **división** del trabajo y la **coordinación**. En definitiva la organización es uno de los puntos de mayor interés de los agentes.

Existen dos tipos básicos de funciones y ambas se pueden realizar por un mismo agente:

- Funciones de operación: están automatizadas y se basan en cumplir una tarea limitada en tiempo y recursos.
- Funciones de gestión de control: se basan en la asignación de tareas, monitorización de la ejecución de éstas, obtención y combinación de los resultados.

La posición de un agente en una organización viene dada por las funciones que cumple y sus relaciones con el resto de agentes.

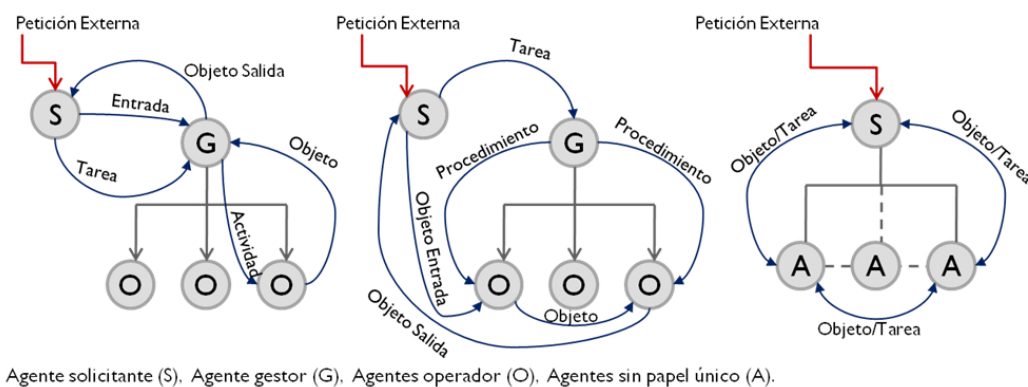
La estructura de organización de un MAS permite generar mecanismos de coordinación que conforman las normas relativas a la participación, asignación de funciones y relaciones, así como protocolos.

Las comunicaciones o solicitudes sobre un entorno u otras partes del MAS son transmitida por: agentes solicitantes (S - requesting), agentes gestores (G - management), agentes operadores (O - operator) y agentes sin papel único (se representan como A).

Estos agentes forman parte de diferentes tipos de protocolos de organización [van Aart, 2005], estos son: la **supervisión directa**, donde el gestor asume la responsabilidad del trabajo de los operadores y se encarga de su coordinación. Este patrón puede ser repetido en varios niveles de una jerarquía. La **delegación** (descentralizada), donde el gestor (organizador) instruye a los operadores con algún procedimiento pero les deja a estos la responsabilidad de ejecución. El **ajuste mutuo**, es un mecanismo de coordinación (cooperativa y altruista) en el cual la organización no tiene ninguna estructura, es decir, el control y el trabajo no están separados.

Para conseguir una buena organización en la resolución de una tarea, es importante la interacción. Los agentes son una entidad proactiva que interactúa con el

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN



**Figura 4.29:** Protocolos de organización [van Aart, 2005].

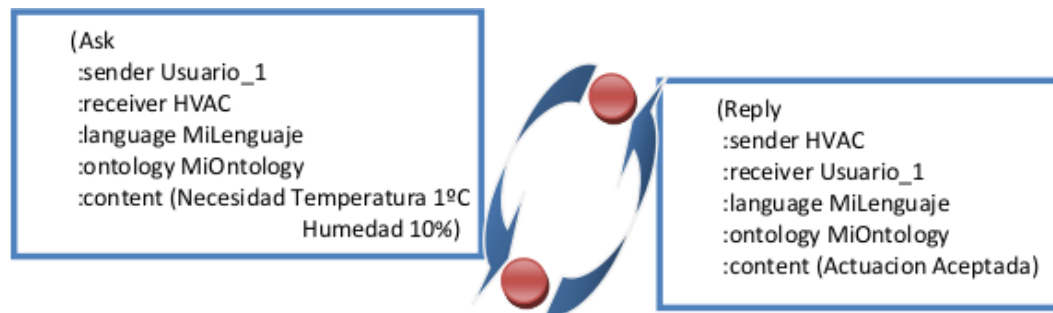
entorno y el resto de los agentes. Ya sea indirectamente, a través del medio ambiente, o por comunicación directa, de esta interacción emergen comportamientos de elevada complejidad.

La coordinación se basa en la comunicación (como indicamos anteriormente) y necesita de un lenguaje para este fin. El primer lenguaje fue KQML en el cual los agentes tienen estructuras que les permiten contar los hechos, hacer las consultas, las suscripciones a los servicios y la búsqueda de otros agentes.

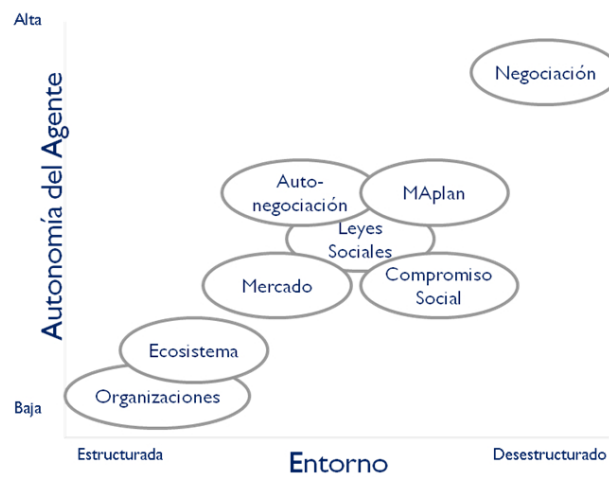
La comunicación e interoperabilidad exige un consenso de la comunidad, por ello se genera una ontología o especificación explícita de las estructuras conceptuales de un determinado dominio, que permite o hace posible distinguir las clases, casos, propiedades, relaciones y funciones de manera coherente.

El otro lenguaje más conocido es ACL (desarrollado por FIPA) que está basado en la teoría de los actos de habla, donde se usa el lenguaje para definir las acciones, las peticiones, las sugerencias, los compromisos y las respuestas. Se utilizan términos “performative” (conductuales) que sirven para identificar el significado del enunciado (request-solicitar, tell-informar, insist-insistir, promise-prometer, etc.). En la figura 4.30 se presenta un ejemplo de uso de ACL.

En la actualidad, existen múltiples configuraciones de interacción. En la figura 4.31 se muestran los tipos de configuraciones de interacción entre agentes existentes según la autonomía del agente y estructura del entorno.



**Figura 4.30:** Ejemplo mediante el uso de ACL.



**Figura 4.31:** Configuraciones de interacción de agentes.

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

### Ontologías

Las ontologías se han desarrollado para mejorar y organizar el intercambio de información necesaria, estructurando la información de forma heterogénea, a través de entidades autónomas. A los agentes que aprovechan las tecnologías de la web semántica como las ontologías se les suele denominar también agentes semánticos.

En los edificios inteligentes esta cuestión se impone principalmente en el desarrollo de redes colaborativa, encargadas del proceso de planificación y decisión. Las ontologías pueden sentar las bases conceptuales para la integración de los sensores, las máquinas controladoras, etc. Una ontología se concibe como un observador del mundo, de los individuos y sus relaciones. Los individuos o agentes pueden ser cualquier cosa, ya sean unos sensores en particular o conceptos abstractos que representan los procesos en una máquina. Con independencia de éstos, los individuos y sus relaciones son dependientes tanto del mundo como del observador. Diferentes observadores o el mismo en papeles diferentes o en diferentes instantes de tiempo puede dividir el mundo de formas diferentes. En los MAS abiertos, fuera de los límites del agente, el conocimiento y las acciones generan múltiples contextos en base al razonamiento, puesto que por lo general el lenguaje y la representación de este es común, aunque en las aplicaciones del mundo real, el razonamiento del sentido común no está muy avanzado.

### Agentes y la tecnología de software

En la última década, la tecnología de agentes y los MAS han tenido un gran auge en un amplio espectro de las tecnologías de la información y el control, como son: redes, ingeniería de software, sistemas distribuidos y concurrentes, tecnologías móviles, comercio electrónico, interfaces, web semántica, etc.

De igual manera está ocurriendo en las investigaciones en el campo del control y toma de decisiones en edificios inteligentes. Cabe preguntarse a que es debido este éxito. Ante la complejidad de los sistemas informáticos que son cada vez más complejos, son necesarias mayores abstracciones y metáforas para explicar y diseñar su funcionamiento. El concepto de agentes permite estructurar nuestro conocimiento, y en consecuencia, el diseño del sistema alrededor de los componentes que permiten dar la autonomía y la capacidad de comunicarse, facilitando así la



descomposición de sistemas tanto desde el punto de vista físico como funcional. Con esta metodología se pueden personalizar y delimitar los agentes con propiedades simples dentro de un entorno. Esto ayuda a describir, explicar y predecir el comportamiento de sistemas complejos. Se genera así una especie de conocimiento social que surge de la acción colectiva de los individuos, y que pertenece al sistema en su conjunto.

En cuanto a la tecnología de software se refiere, los agentes y MAS proporcionan una amplia gama de modelos, técnicas, métodos de modelado y metodologías de desarrollo que forman un paradigma denominado: Software de ingeniería orientada a agentes (AOSE, *Agent-Oriented Software Engineering*).

Actualmente se han desarrollado varios programas, lenguajes y entornos de desarrollo de software que no sólo apoyan la programación de MAS, sino también ponen en práctica conceptos clave de los MAS en un framework unificado.

Una vez que el diseñador define los agentes y sus interconexiones, las siguientes plataformas permiten al autor construir el sistema de agentes con relativa facilidad.

**Tabla 4.6:** La Tecnología [Gómez Sanz, 2003].

Frameworks	Comunicación	Comunidades Abiertas OWL	Desarrollo completo
Jade	KQML	DAML	AOSE
CybelePro IAI	FIPA	XML	Gaia
JACK o Jadex		RDF	Tropos
Swarm - Repast			MaSE
Agent Zeus Toolkit			
Cougaar Agent Architecture			
Ingenias			
Mimose			
Zeus			
SimAgent			

En la tabla 4.6 se pueden ver algunos de los más conocidos frameworks existentes en el mercado. Dos plataformas de comunicación compatibles KQML y FIPA, ambas basadas en java, por lo que son independientes de la plataforma, mientras esta tenga acceso a la máquina virtual de java.

## 4. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

---

Asimismo se han desarrollado infraestructuras para comunidades abiertas de agentes, estas tecnologías son la base de los desarrollos del OWL (*Web Ontology Language*) o lenguaje de ontologías web, se trata de herramientas que permiten elaborar semánticas para su aplicación en la comunicación. De igual forma se han desarrollado herramientas para el diseño e implementación de aplicaciones basadas en agentes, que cubren el desarrollo total o completo del sistema.

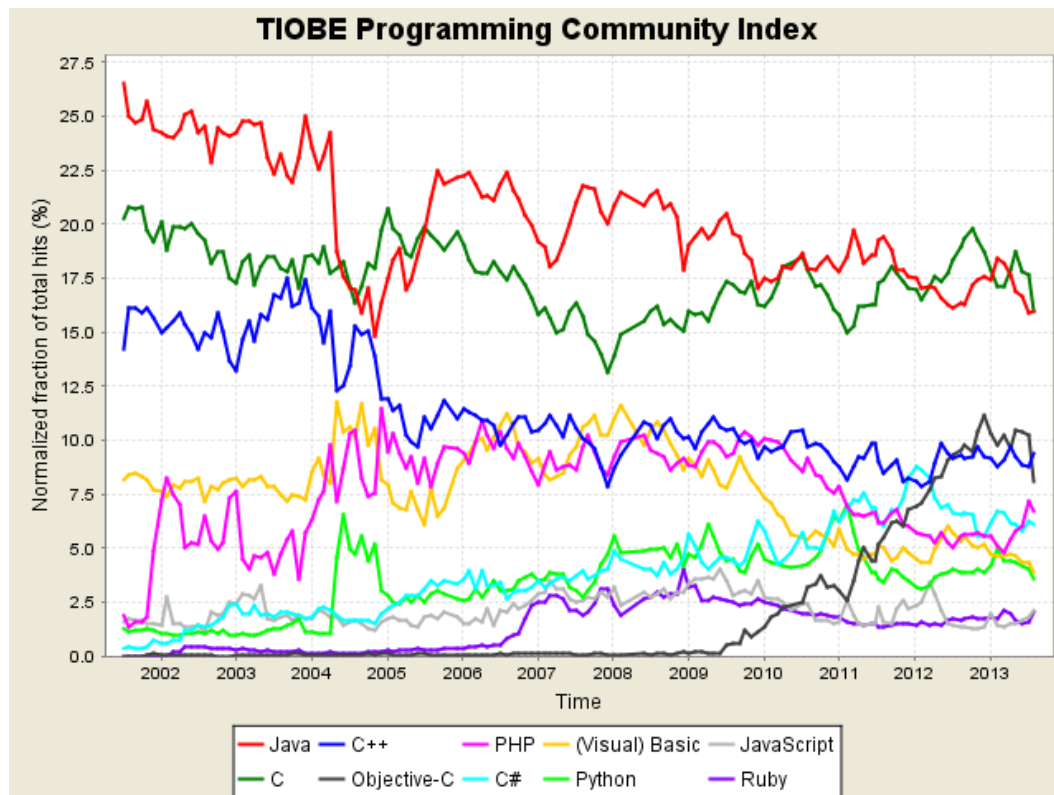
### 4.7 Lenguajes de programación

En este apartado, se hace mención a los lenguajes de programación, elemento importante en el desarrollo de las técnicas de resoluciones de problemas. Aunque todos los lenguajes pueden ser utilizados, en el desarrollo de esta tesis se han utilizado los lenguajes Java, de manera general, C en la programación de micro-controladores, Javascript y PHP en el desarrollo web. Como se puede observar en la figura 4.32, todos pertenecen a los 10 primeros lenguajes del índice TIOBE.

Además, como se puede observar en la figura 4.32, en los últimos 10 años, no ha cambiado mucho la relevancia de los lenguajes de programación. Actualmente, siguen destacando el lenguaje C y Java. Probablemente, la razón principal se encuentre en que es muy difícil migrar de una gran base de código de un lenguaje a otro. Así que los cambios son lentos. Existen nuevos lenguajes como Scala al cual se le augura un crecimiento en los próximos años. Otros lenguajes, pese a ser muy utilizados en la ingeniería no tiene tal impacto en la realidad, un ejemplo es MATLAB, en el puesto 23, con una fracción de uso del 0.485 % (índice TIOBE).

Entender la diferencia entre los lenguajes de programación es crucial. Aunque en ciertas ocasiones es impuesto por el cliente. Si se elige el idioma equivocado para un proyecto, el cambio supondría una gran cantidad de tiempo y esfuerzo. El conocimiento de cómo los lenguajes se diferencian unos de otros es la clave para tomar decisiones correctas. Teniendo en cuenta que existen muchas creencias falsas y rumores.

Según Prechelt [Prechelt, 2000], tras el análisis comparativo de varias implementaciones, diseñar y escribir programas en, por ejemplo Perl o Python, tiene sólo la mitad de todo el tiempo que escribirlos en C, C++ o Java y el programa resultante sólo consume la mitad del tiempo. Sin embargo, no se observan diferencias en la



**Figura 4.32:** Índice TIOBE.

fiabilidad del programa entre los grupos lingüísticos. El consumo de memoria típica de un programa de escritura es aproximadamente el doble que el de un programa C o C++. Para Java el consumo es más alto. Sin embargo, a partir de JDK 1.2.1, la sobrecarga de memoria de Java sigue siendo enorme en comparación con C o C++, pero la eficiencia de tiempo de ejecución se ha convertido en bastante aceptable. Su tiempo de ejecución relativa y la sobrecarga en el consumo de memoria a menudo es aceptable y puede ofrecer ventajas significativas con respecto a la productividad del programador. Por tanto, el factor limitante en el desarrollo de algoritmos en Java, se suele producir en la memoria.



## Conclusiones de interés para el desarrollo de la tesis

En el presente bloque, que es un eje fundamental e introductorio de las técnicas que se presentan en los bloques posteriores. Se ha presentado una visión general de algunos conceptos de interés.

Se han definido los sistemas expertos y los sistemas de ayuda a la toma de decisiones. Más adelante, se desarrolla un sistema experto que ayuda a la toma de decisiones en el diseño de los edificios, y otro que ayude en la toma de decisiones de un sistema de climatización.

Igualmente, se han definido técnicas de resolución, tales como la lógica difusa, que es aplicada en algoritmos de confort, o redes neuronales que son aplicadas por algunos autores a los que se hará referencia. Además, para no extenderse en este bloque, se han clasificado y se han presentado un conjunto de meta-heurísticas. Con especial interés se ha profundizado en aquellas meta-heurísticas que son aplicadas en la propia tesis, como es el caso del algoritmo tabú, o que han sido aplicadas por otros investigadores en investigaciones de interés que son mencionadas en los siguientes bloques.

Por último, se ha desarrollado un breve estado del arte de los sistemas multi-agentes, pues como se mencionará en las conclusiones finales, en este campo se

## **5. CONCLUSIONES DE INTERÉS PARA EL DESARROLLO DE LA TESIS**

---

pueden desarrollar sistemas de ayuda al control y toma de decisiones durante la vida útil de un edificio. No sólo en los sistemas de HVAC, sino también en los sistemas de iluminación, seguridad u otros elementos de control.

Además, se ha presentado y justificado el uso de los lenguajes de programación empleados en el desarrollo de aplicaciones asociadas a esta tesis.

# **Bloque II**

## **Edificación sostenible**





*Cada edificio debe contribuir a hacer nueva la ciudad*

César Pelli

CAPITULO

# 6

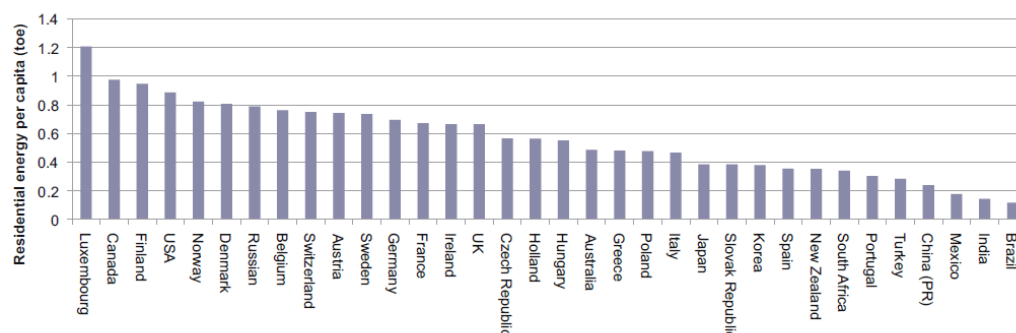
## Diseño y desarrollo de edificios

En el bloque I se hizo una revisión del estado actual del término SE, sus metodologías y técnicas. En este capítulo se presenta una revisión de las metodologías y técnicas actuales en el diseño y desarrollo de edificios para las que se aplican los SE.

### 6.1 Introducción

El uso mundial de la energía está planteando grandes preocupaciones por el agotamiento de los recursos energéticos y por el impacto ambiental generado por el uso ineficiente. La edificación sostenible es uno de los retos de mayor actualidad. Existe un índice global para medir el progreso de los países hacia la creación de un entorno construido de carbono cero en términos de consumo de energía y producción. Este índice muestra que España se encuentra en el sexto puesto en cuanto a consumo y el diecisieteavo en oferta de energía renovable [Rydin y Austin, 2010], respecto de un ranking de 34 países. En 2007 España ocupó el veintiseisavo país que más energía consumía residencialmente por habitante (en toneladas equivalentes de petróleo), como se observa en la figura 6.1.

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS



**Figura 6.1:** Consumo de energía residencial per cápita [Rydin y Austin, 2010].

La *Agencia Internacional de la Energía* (AIE) proporciona estos datos con el objetivo de medir el progreso de los países hacia la creación de entornos construidos con una cantidad cero de carbono, es decir, este índice se proporciona como medidor de la edificación sostenible que desarrolla cada país.

El sector de la construcción consume el 40 por ciento de la energía en Europa [UE et al., 2010]. Ante esta situación, la *Unión Europea* (UE) ha diseñado estrategias de ahorro y eficiencia energética para los edificios, en cumplimiento de la Directiva 2002/91/CE de eficiencia energética [UE y Council, 2002], que pretende conseguir la reducción de la demanda energética de los edificios de nueva construcción.

En la figura 6.2 se puede observar el consumo unitario total por  $m^2$  de las zonas residenciales en la UE. Para la UE el consumo energético de los edificios es la mayor prioridad, por esta razón surgen diversas directivas y estándares [UE y Council, 2002] [CEN, 2005] [CEN, 2006]. El objetivo marcado para el año 2020, pretende mejorar la eficiencia energética de la UE en un 20 % [UE, 2007] [Gobierno de España, 2006].

En España, se estima que el consumo final de energía atribuido a la edificación es de un 35 %. El *Código Técnico de la Edificación* (CTE) [Ministerio de Fomento, 2013] [UE et al., 2010] español es la herramienta, con la que se pretende que los edificios de nueva construcción rebajen su demanda energética en un 25 %. Implementando medidas para reducir la demanda, se pretende mejorar los elementos constructivos, al mismo tiempo que se establecen otras medidas como



**Figura 6.2:** Consumo unitario total por  $m^2$  de zonas residenciales para el clima estándar del país [ENTRANZE project, 2013].

un rendimiento mínimo para las instalaciones energéticas, haciendo obligatoria la energía solar-térmica, con el fin de que el consumo final se rebaje considerablemente. Así, se pretenden construir edificios energéticamente sostenibles, donde el balance energético sea nulo o el más bajo posible.

Este desarrollo sostenible se centra en cinco líneas básicas:

- Cero emisiones de carbono en la vivienda y fabricación de sus materiales.
- Certificación de edificios.
- Equipamiento que favorezca el aislamiento de energía.
- Contratación pública sostenible.
- Construcción sostenible.

Este bloque se centra en la importancia que tiene la reducción del consumo energético, el coste de vida de los edificios y la certificación de edificios. Actualmente, estos tres puntos son trascendentales en el diseño y desarrollo de los edificios.

Desde 2003 existe un certificado de eficiencia energética a nivel europeo [Comunidad Europea, 2003]. Éste permite a los estados miembros de la UE que, cuando los edificios sean contruidos, vendidos o alquilados, se ponga a disposición del

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

---

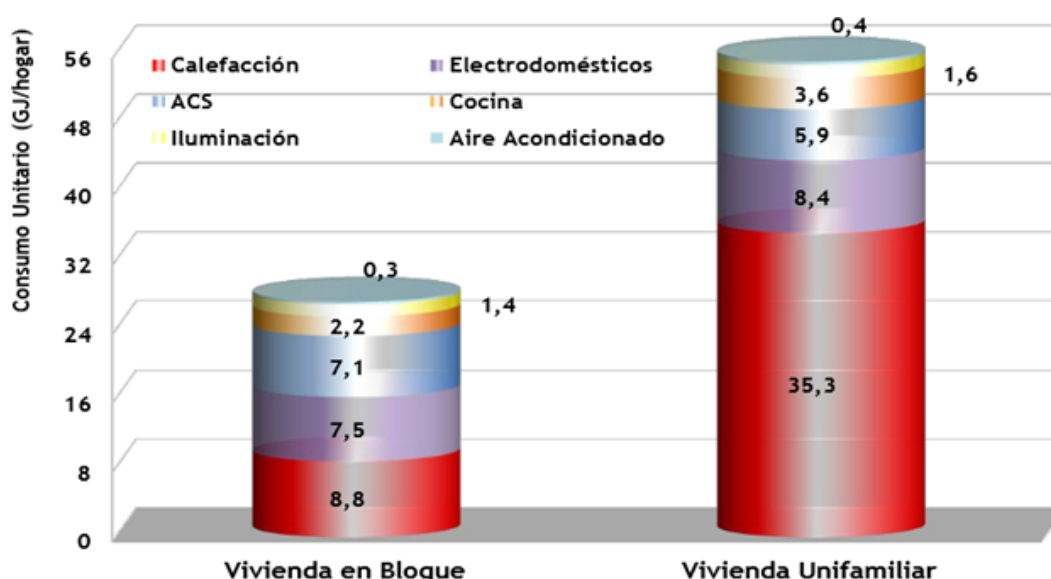
propietario, comprador o inquilino, un certificado de eficiencia energética, cuyo objeto es suministrar información a estos usuarios.

La gestión adecuada de la energía en edificios recibe una creciente atención de las autoridades y miembros de la comunidad científica. El esfuerzo se centra en una mayor atención en la utilización eficiente de todas las fuentes de energía. Esta atención se ve confirmada por las múltiples publicaciones realizadas en este campo, algunas de ellas se verán en este bloque. Además, la emisión de directivas de la *Comisión Europea* (CE) se dirige tanto a aumentar el nivel de atención de los países miembros, como a homogeneizar lo máximo posible las evaluaciones energéticas que se realizan a nivel nacional en los diferentes países.

En España, la demanda energética es diferente en función del tipo de vivienda residencial, ya sean unifamiliares o de bloque. Existe un mayor equilibrio entre el consumo de combustibles y electricidad en las viviendas en bloque, y un mayor predominio del consumo de combustibles en las viviendas unifamiliares. Por esta razón, las mayores demandas asociadas a la calefacción se derivan de la mayor superficie de estas viviendas, su mayor grado de ocupación y la preferencia por sistemas basados en fuentes energéticas que utilizan combustibles.

En la figura 6.3 se aprecia claramente que los consumos de las viviendas unifamiliares superan a los de las viviendas en bloque o pisos, sobre todo en lo relativo a consumos asociados a la calefacción. El consumo total de una vivienda unifamiliar duplica el de una vivienda en bloque, siendo el consumo de calefacción cuatro veces superior. La figura 6.3 presenta un ejemplo en clima de invierno dominante. En caso de ser verano dominante el consumo de aire acondicionado sería mayor y el de calefacción menor, pero la relación entre vivienda en bloque y unifamiliar es similar.

El análisis basado en un sistema de información o de modelado de información de construcción (BIM, *Building Information Modeling*), permiten a los diseñadores evaluar las estrategias alternativas de energía y sistemas [Stumpf et al., 2009]. Este tipo de tecnología en creciente desarrollo no está totalmente explorada debido a la complejidad y los enormes costes que supone el modelado de la construcción [Eastman et al., 2008]. Una visión general es proporcionada por [Wilde y Voorden, 2004]. A nivel normativo, la comunidad está en constante revisión de estas normativas que pretenden mejorar otros aspectos constructivos, como son la



**Figura 6.3:** Análisis del consumo energético unitario según el tipo de vivienda [Proyecto SECH-SPAHOUSEC, 2011].

aplicación de los sistemas de calefacción y refrigeración para el confort de los usuarios, o la calidad del aire interior y la eficiencia energética [Rodríguez-Soria et al., 2012].

En España, LIDER para el cálculo de la demanda energética de un edificio, y CALENER para la calificación energética, son las aplicaciones informáticas que permiten cumplir con la opción general de verificación de la exigencia de limitación de demanda energética establecida en el Documento Básico de la Habitabilidad y Energía del Código Técnico de la Edificación (CTE-HE1) [Ministerio de Fomento, 2013], patrocinadas por el Ministerio de Vivienda y por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Estas herramientas están diseñadas para realizar la descripción geométrica, constructiva y operacional de los edificios, así como para llevar a cabo la mayor parte de los cálculos recogidos en el CTE-HE1.

En la actualidad, los usuarios no disponen de una metodología simple de diseño, que les permita de manera rápida realizar diseños que afinen de manera óptima las necesidades y cambios arquitectónicos necesarios para mejorar el coste del ciclo de vida y la posterior evaluación energética de los edificios que diseñan. La metodo-

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

---

logía desarrollada en este bloque de la tesis utiliza un modelo acelerado de cálculo, como filtro inicial a las herramientas oficiales de certificación.

La resolución del problema con las herramientas oficiales, se calcula mediante un motor de cálculo que estudia la demanda energética del edificio para las temporadas de calefacción y refrigeración establecidas en el CTE, para lo cual se emplea una base de datos meteorológicos que describen la variación característica de las variables climáticas en estos periodos de tiempo. La evaluación del edificio se realiza mediante la simulación dinámica de su comportamiento. En su proceso de valoración energética los procesos de respuesta del edificio son sometidos a sus condiciones de contorno dependientes del tiempo, por esta razón la complejidad del proceso provoca requerimientos de tiempo de cálculo considerables, que hacen de este método, poco efectivo para el estudio de comportamiento del edificio ante diferentes elementos constructivos. Por esta razón, surge la necesidad de acelerar el proceso. Normalmente, en el proceso de diseño se suele recalcular el edificio con diferentes elementos constructivos, buscando mejoras en el coste y en la eficiencia del edificio. Sin embargo, no existe un algoritmo o heurística específica que dé una solución satisfactoria al problema actual. Por esta razón, se ha desarrollado una meta-heurísticas basada en la Búsqueda Tabú [Glover y Laguna, 1998], que se apoya en un modelo de cálculo simplificado [Álvarez et al., 2012] [Guadix et al., 2012] que permite agilizar el análisis.

La metodología se ha aplicado en diferentes edificios, para reducir la demanda, el coste del ciclo de vida o la calificación energética. Sin embargo, la toma de decisiones en que se basa la búsqueda de la solución óptima, tiene que unir factores ambientales (emisiones de  $CO_2$ ), energéticos (demanda), financieros (inversión, costes de emisiones de  $CO_2$  y demanda) que comprenden el *Coste del Ciclo de Vida* (CCV), con el objetivo de alcanzar la mejor solución posible.

### 6.2 Motivaciones

En el desarrollo de estas nuevas herramientas existe una necesidad de dominar todo el conocimiento y experiencia existente para realizar una auditoría energética. La experiencia se obtiene del análisis del ejercicio de construcción (en las diferentes

categorías funcionales) y del almacenamiento del conocimiento detallado de las posibles oportunidades de conservación de energía.

Este tipo de herramientas informáticas mejoran en gran medida las técnicas de auditoría. Su desarrollo va dirigido principalmente al gran número de profesionales (ingenieros, arquitectos y técnicos) que se encarga de construir el edificio con una certificación energética. Éste es un requisito cada vez más importante para construir o adaptar edificios y fundamental para las empresas cuya actividad es el ahorro de energía en la construcción, e incluso en servicios públicos de energía que participan en programas de gestión de la demanda.

No importa lo experimentado que sea un profesional, es casi imposible que sin herramientas informáticas avanzadas los profesionales dominen de manera eficiente todas las normas, estándares, reglas y reglamentos regulatorios, criterios de seguridad, costes, etc. Los expertos deben tener siempre en cuenta toda esta información para que la toma de decisiones se haga en las mejores condiciones. El uso de estas aplicaciones garantiza la fiabilidad y la exhaustividad de las auditorías.

Estas herramientas mejoran la relación coste-eficiencia de las auditorías. E incluso podrían mejorar la calidad de la auditoría considerablemente, ya que se podría dedicar más atención a las mediciones de campo y menos tiempo a las pre-auditorías o la elaboración de informes.

Los sistemas mencionados permiten impulsar o reforzar la formación de los nuevos auditores, ya que estas herramientas incluyen las normas, los procedimientos de cálculo, la información técnica más reciente en materia de ahorro de energía y otras aplicaciones de energía renovable aplicadas en los edificios.

No obstante, actualmente los mercados demandan la aclaración de algunos detalles de los reglamentos y del proceso de certificación. Sin embargo, las áreas de mayor preocupación para los inversores de propiedad son:

- Los costes de la información.
- Las posibles dificultades del proceso.
- La escasez de evaluadores.

Estas áreas de preocupación han de ser analizadas de cara al futuro [Dixon et al., 2008] y son las que dan lugar al desarrollo de los SE en este área.

## **6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS**

---

En los siguientes apartados se muestran algunos casos o estudios de SE aplicados a la certificación energética de los edificios. Aunque existen otros estudios en lo que se refiere a la instalación de alumbrado, acústica, térmica y la calidad del aire interior para los ocupantes, en los que también se estudia la mejora de la calidad residencial de los ocupantes del edificio [Davis, 1986].

### **6.2.1 Motivaciones económicas**

Actualmente, con la coyuntura económica en la que se encuentra el sector de la construcción, uno de los problemas más recurrentes con los que se enfrenta es la falta de técnicos capacitados para estudiar la eficiencia energética de los edificios, pues éste es un campo muy específico y existe un coste elevado cuando se contratan los servicios de estos profesionales. Por tanto, el conocimiento humano (la toma de decisiones y opinión) es uno de los bienes más demandados.

En la actualidad, a través del estudio de situaciones que ocurren durante el diseño, junto con la ayuda de personal especializado, se pueden crear sistemas que simulen o “imiten el comportamiento de un experto humano en la solución de un problema en un campo particular” [Hu, 1987] de esta materia. Como se indicó anteriormente, este tipo de aplicación almacena el conocimiento proporcionado por los expertos sobre el diseño o desarrollo del edificio y ayuda a solucionar el problema.

Todo experto comparte una característica común, debe tomar decisiones acertadas en ambientes rodeados de riesgo e incertidumbre, pero poseen la habilidad superior de hacerlo como resultado de su entrenamiento, experiencia y práctica profesional [Biondo, 1990]. Por tanto, para desarrollar este tipo de sistemas se debe transferir la inteligencia humana, la cual se compone de hechos, conceptos, reglas y conocimiento heurístico. A partir de esta transferencia de conocimiento, se puede definir la arquitectura de un sistema que permita luchar contra el actual coste de los expertos en la materia.

### **6.2.2 Motivaciones tecnológicas**

El futuro de los edificios pasa por la búsqueda de soluciones energéticas eficientes, tanto a nivel de la epidermis edificatoria, como de la selección de equipos y sistemas de acondicionamiento, sin olvidar la utilización de energías renovables.



Las soluciones a las mejoras energéticas de los edificios, pasan por identificar y analizar conceptualmente el consumo energético de los edificios en base a la transferencia térmica de sus componentes y materiales. En la actualidad, se realizan estudios mediante simulación de edificios hora a hora durante un periodo anual, debido al efecto que produce la zona climática en el consumo de los edificios.

Además, se estudia el uso de instalaciones de *Agua Caliente Sanitaria* (ACS) e iluminación. En el caso de la calefacción y la refrigeración, se estudia la variación en las prestaciones de los equipos (rendimiento, EER, COP, potencia útil, etc.). La demanda de todas las instalaciones, también depende de las condiciones ambientales o zona climática, del tipo de edificio, orientación y de sus características, por lo que se debe prestar especial atención a estas variables.

## 6.3 Objetivos

El objetivo es desarrollar un sistema y una metodología capaz de:

- Realizar un análisis energético que permita evaluar el consumo y el coste del ciclo de vida de un edificio.
- Alcanzar la calificación energética de un edificio, en base a las características del edificio y mediante la selección de la instalación de calefacción y refrigeración correspondiente.
- Mejorar la eficiencia energética y minimizar el impacto económico.
- Optimizar modelos a través de diferentes escenarios que mejoren el edificio según los objetivos establecidos.
- Realizar informes con las recomendaciones de diseño consecuencia de la aplicación de la metodología.
- Presentar el consumo energético anual para las diferentes alternativas propuestas, el ahorro energético logrado respecto al edificio inicial de estudio o la reducción de emisiones de  $CO_2$ .

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

---

Estos objetivos pretenden ayudar a promover la sostenibilidad en la edificación, de forma que se establezcan criterios para la comparación y cuantificación de diferentes edificios. Para así poder estimular la excelencia y sostenibilidad como valor añadido al edificio como producto que influya en la toma de decisiones en el proceso de diseño de los edificios. Se espera que como consecuencia, estas nuevas metodologías ayuden a estimular el mercado por medio de la diferenciación.

### 6.4 Requisitos constructivos

La edificación sostenible es el reto del futuro en el sector de la construcción. La transformación del sector de la construcción hacia la sostenibilidad se debe a varios factores. Para acelerar la transformación, la sociedad actual presta atención a los diversos campos que afectan al sector, como son: la política, la legislación, los mercados e inversión, las normas y por último el desarrollo tecnológico y la investigación. No existe una definición simple de lo que es la sostenibilidad en los edificios. El concepto más amplio de la propia sostenibilidad está abierto a una variedad de definiciones, las cuales, en cierta medida reflejan las diferentes posiciones de las personas o instituciones que proponen la definición. De manera general, la sostenibilidad según las Naciones Unidas debe asentarse en tres pilares interdependientes: el económico, el ambiental y el social. Hoy en día, hay una serie de normas y sistemas de clasificación para hacer frente a la necesidad de crear edificios más sostenibles. Las nuevas normas que permiten avanzar a la sociedad hacia un mundo más sostenible tienen en cuenta las circunstancias sociales, geográficas y económicas de los países que las desarrollan. En este bloque se presentan las normas españolas y europeas en materia de legislación, normas y sistemas de calificación.

El desarrollo del siguiente bloque se basa en los siguientes principios de construcción:

- Los edificios deben mejorar el medio ambiente y la calidad de la vida.
- Los edificios deben poder ser contruidos y renovados pensando en la sostenibilidad, es decir, en los aspectos: medio ambiental, social y económico.

## **6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad**

---

- La tecnología permite la innovación, la constante exploración y desarrollo de soluciones sostenibles.
- Los edificios deben ser seguros, acogedores y asequibles, para proporcionar a cada persona una cantidad razonable de comodidad.
- Los edificios deben ser diseñados para aprovechar al máximo los recursos naturales de su entorno, incluyendo la luz del día y el agua, para reducir la energía y materiales de consumo y crear un mejor ambiente interior.
- Desde el diseño hasta la demolición y reciclaje, los edificios sostenibles se deben planificar con una perspectiva de ciclo de vida tanto en el medio ambiente como en el impacto económico.
- La optimización para desarrollar una construcción sostenible permite el retorno de la inversión, la reducción de los costes de operación, aumentan la productividad de los empleados y mejora el confort. Además es una herramienta de planificación para proteger la inversión frente a las amenazas externas, como por ejemplo, el aumento de los precios energéticos.

## **6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad**

En este apartado se presentan algunos métodos aplicados en la actualidad en el campo de los SE para el diseño y desarrollo de edificios.

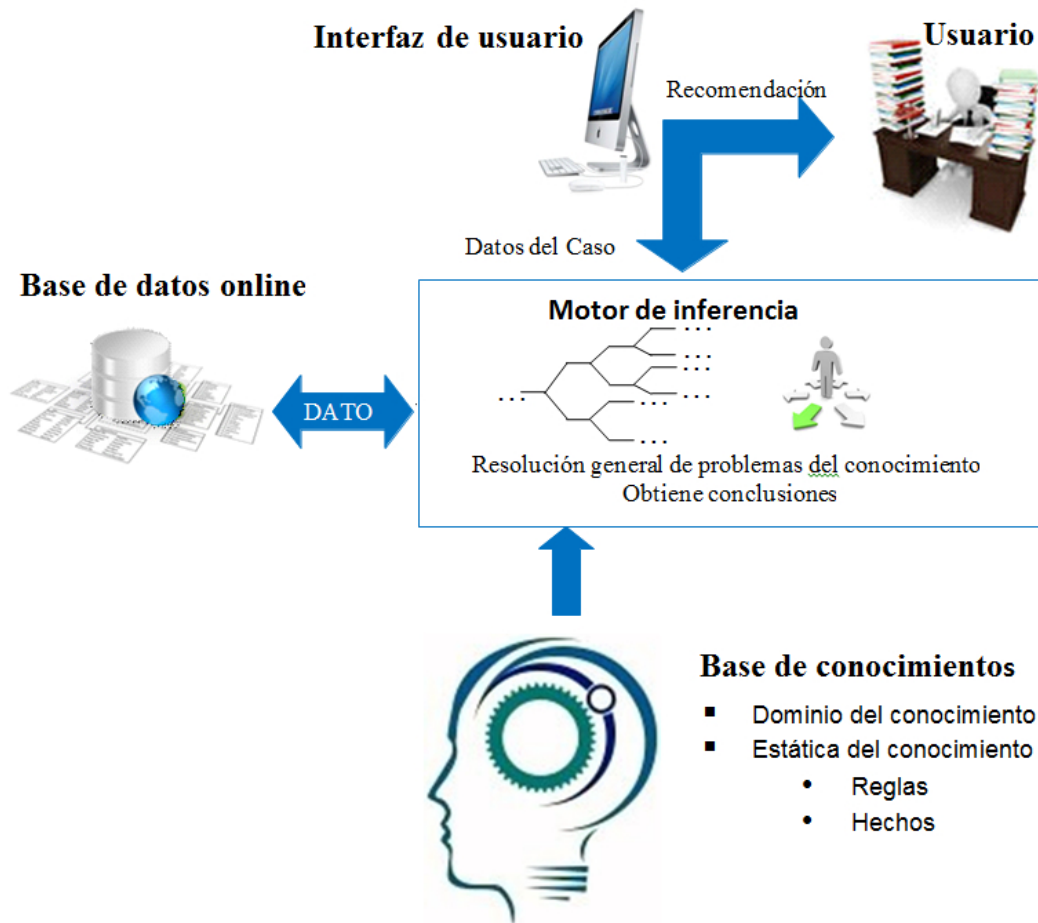
### **6.5.1 El sistema experto - Lógica proposicional**

En la literatura se pueden encontrar referencias de la aplicación de la lógica proposicional a edificios energéticamente sostenibles. La lógica proposicional se construye a partir de cuatro componentes:

- Las variables de la lógica.
- Las reglas de la lógica.

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

- El motor de razonamiento o inferencia.
- El módulo de creación de resultados.



**Figura 6.4:** Ejemplo de arquitectura en un SE.

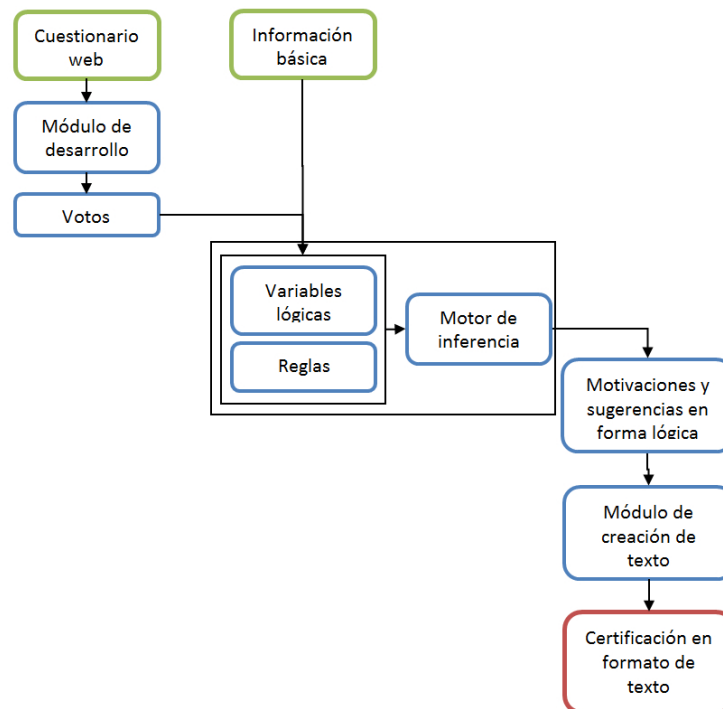
Las variables lógicas son aquellas que describen el estado del sistema, es decir, la información proporcionada por la evaluación del usuario, y también la información dinámica que se produce por parte del propio sistema. Estas variables pueden ser de cuatro tipos diferentes:

- Variables basadas en los datos observados, es decir, la información proporcionada por el usuario, por ejemplo, el tipo de edificio, su edad, el tipo de sistema de calefacción y/o refrigeración instalado, etc.

## 6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad

- Variables derivadas de los datos observados, se utilizan para describir conceptos intermedios necesarios para formular el razonamiento del sistema.
- Variables asociadas a sugerencias. Representan las acciones que se pueden tomar para mejorar la evaluación del edificio.
- Variables asociadas a las motivaciones.

El objetivo es presentar una explicación en base a la información aportada, de forma que pueda ser interpretada por el usuario y, así, reforzar el nivel de confianza de éste. En la figura 6.5, se presenta la arquitectura de un SE basado en la lógica proposicional, en éste se presentan dos entradas de datos, una de ellas mediante un cuestionario, y una salida en forma de certificación en formato de texto.



**Figura 6.5:** Arquitectura de un SE basado en la lógica proposicional.

Las reglas lógicas constituyen el núcleo del sistema. Expresan la lógica proposicional, las relaciones entre las variables descritas y reproducen el conocimiento de los expertos que han contribuido en su desarrollo. Las reglas lógicas se pueden dividir en tres grupos:

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

---

- Normas que establecen el valor de las variables lógicas derivadas de los datos observados. Por ejemplo, una variable lógica asociada con la dispersión de la ventana puede tener un valor verdadero si el número de ventanas expuestas a norte o noroeste es pertinente y si no se aplica doble acristalamiento, o si las ventanas no se han sustituido recientemente.
- Normas que establecen el valor de las variables asociadas con la lógica de sugerencias. Por ejemplo, una norma de este grupo sería: Se puede afirmar que si la residencia tiene ventanas en la dirección norte y las ventanas son antiguas, se puede sugerir la posibilidad de generar ahorro energético mediante la sustitución de las ventanas.
- Normas que establecen el valor de las variables asociadas con la lógica de las motivaciones. Estas normas tratan de identificar las principales razones que han generado el cómputo de una votación. Por ejemplo, una norma de este grupo puede afirmar que si la valoración del revestimiento del edificio es baja y el edificio es antiguo, a continuación, la votación puede ser motivada por el estado del revestimiento.

El motor de razonamiento o inferencia es el sistema que procesa las variables lógicas basándose en datos observados y normas, estableciendo así las variables que definen las motivaciones y las sugerencias que representan el resultado final del proceso. La función del motor de inferencia es aplicar las posibles reglas que satisfacen un problema, utilizando ciertas estrategias de control sistemáticas o heurísticas.

Las estrategias de control sistemáticas son algoritmos de control de hechos cuya metodología se basa en una exploración exhaustiva y metódica de la base de conocimientos. Ejemplos de estrategias de control sistemático son:

- Según el sentido de enlace entre las reglas lógicas:
  - Encadenamiento hacia delante (forward-chaining).
  - Encadenamiento hacia atrás (backward-chaining).
- Según la dirección en la topografía que desarrollan las reglas:

## **6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad**

---

- Búsqueda en profundidad.
- Búsqueda en anchura.
- Según la estrategia de unificación (pattern-matching).
  - Régimen de control irrevocable.
  - Régimen de control por tentativa.

Las estrategias anteriores son muy generales e ineficientes para los problemas NP-duros por la rigidez de las estrategias de búsqueda. Las estrategias de control basadas en heurísticas resuelven este problema, pues éstas aportan especificidad y orientación en la resolución del problema. Las heurísticas resuelven los problemas eficientemente, utilizando indicios que permiten la reducción del espacio de búsqueda de la solución, para la obtención de una solución aceptable en un tiempo razonable.

Finalmente, el módulo de creación de resultados analiza los valores de las variables de la lógica después de la ejecución del motor de razonamiento y produce un texto. Dicho texto expresa las motivaciones y las sugerencias en forma de certificado de lenguaje natural. Este proceso se basa en una asignación entre variables lógicas y cadenas de texto, que se escogen en base a reglas sintácticas elementales.

Por lo general, el SE utiliza una base de conocimiento dinámica de autoaprendizaje, es decir, elabora y escribe las respuestas de nuevo en base a datos.

Todo el conocimiento (la definición de todas las variables lógicas, las reglas y las cadenas de texto relacionadas con los valores) se almacena permitiendo ser editado y modificado por los diseñadores del sistema. La gestión del conocimiento se mantiene independiente de tal manera que las nuevas variables lógicas, reglas y cadenas de texto puedan ser añadidas al sistema sin necesidad de ningún cambio en la fase de cómputo.

En el siguiente apartado se presenta una aplicación de un SE para el desarrollo de auditorías energéticas. Se debe destacar que el término “auditoría” no sólo identifica los flujos de energía en edificios, sino también las oportunidades de conservación de energía más adecuadas, incluso los requisitos de mantenimiento de la energía.

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

---

### 6.5.2 Aplicación basada en la lógica proposicional

En [De Santoli y Felici, 2005] se presenta un SE para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios. El sistema es una aplicación de Internet capaz de mostrar los resultados de la calidad certificada de un edificio. La herramienta utiliza la evaluación de los edificios de forma flexible y completa, y se podría extender a diferentes condiciones ambientales. El procedimiento de evaluación está diseñado, implementado y gestionado en una web.

El SE de [De Santoli y Felici, 2005] se integró en una herramienta de software de nombre BEEPS (*Building Energy and Environment Performance System*) que realiza un análisis del ciclo de vida respecto del suministro de material y el equilibrio de energía a lo largo de toda la vida del material, producto o servicio.

El sistema se realizó a medida para la generación de los certificados de rendimiento energético de los edificios en Italia, teniendo en cuenta las condiciones climáticas, los requisitos ambientales interiores, el medio ambiente y la rentabilidad (coste-eficiencia). Este tipo de aplicación representa el conocimiento de los expertos en evaluación de energía y hace que los conocimientos estén disponibles a los usuarios de una manera comprensible y concisa. El sistema aplica un conjunto dinámico de normas y procesos de datos sobre el edificio, extrae las conclusiones adecuadas y construye un certificado en forma de texto. En este certificado se combina la información del análisis con las motivaciones y sugerencias que mejoran la eficiencia energética del edificio considerado.

El sistema descrito de manera general por la herramienta BEEPS propone la combinación de cinco votos dados a los diferentes aspectos del edificio en una única puntuación global validada a través de un conjunto de reglas lógicas. Los cinco votos se determinan por procedimientos de análisis y algoritmos.

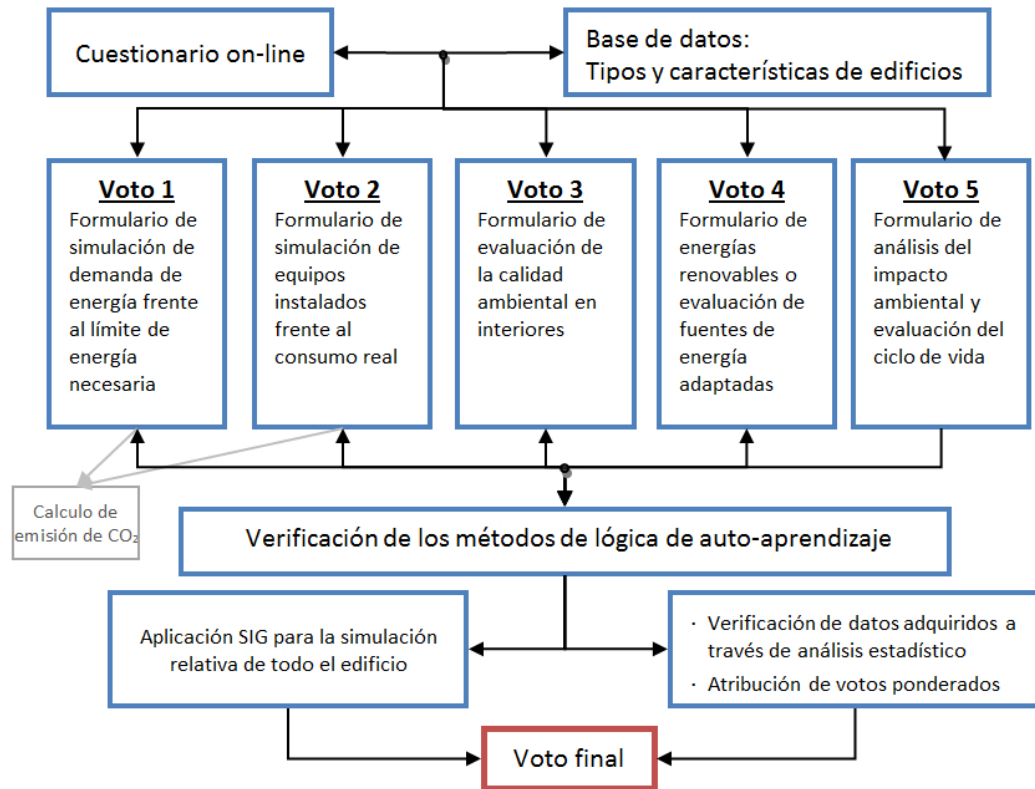
Las reglas lógicas de este sistema se determinaron por un grupo de expertos, y a partir de ellas se identifica la motivación de los votos y se sugiere un curso de acción para mejorar, si es posible, los votos obtenidos por el edificio.

La figura 6.6 muestra el esquema general para el procedimiento adoptado en la herramienta BEEPS. En ésta se presentan cinco evaluaciones diferentes que están relacionadas con:

1. Revestimiento del edificio.



## 6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad



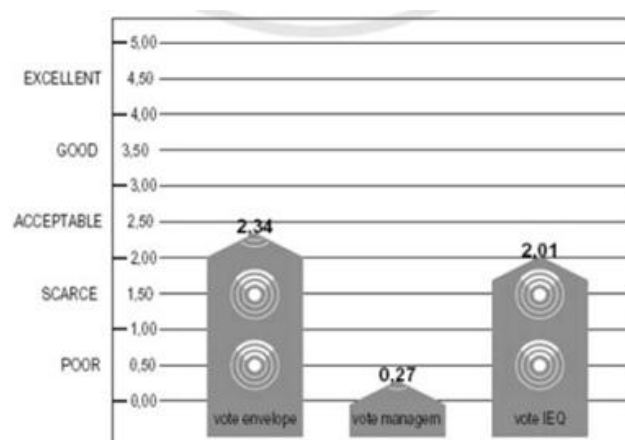
**Figura 6.6:** Formulario de evaluación simplificado del programa BEEPS [De Santoli y Felici, 2005].

2. Servicios de construcción.
3. Calidad ambiental interior.
4. Utilización de energías renovables (incluyendo el uso pasivo de los edificios).
5. Análisis del impacto medioambiental y evaluación del ciclo de vida.

La evaluación del funcionamiento del edificio parte de un conjunto de cinco formularios de evaluación simple en los que el usuario proporciona información acerca de los edificios tales como: las dimensiones del edificio, su exposición, el año de construcción, el número de ventanas, etc. Los cuestionarios los diseñaron de tal manera que se puede compilar directamente por el usuario final, sin necesidad de conocimientos especializados en la materia.

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

---



**Figura 6.7:** Salida de la evaluación de BEEPS [De Santoli y Felici, 2005].

A partir de la información proporcionada por el usuario el sistema experto genera los cinco votos iniciales (cuya escala numérica de 0 a 5 tiene asignado un valor cualitativo) según se muestra en la tabla 6.1 y figura 6.7.

**Tabla 6.1:** Votos de evaluación de BEEPS.

De	A	Voto
0	0.99	Pobre
1	1.99	Insuficiente
2	2.99	Aceptable
3	3.99	Bueno
4	5.00	Excelente

La evaluación expresada en forma de texto, se obtiene automáticamente a través de un procedimiento vinculado a los resultados que se calculan por el programa, el procedimiento consta de dos partes:

- La primera es una clasificación en forma de texto correspondiente a la calificación numérica.
- La segunda parte es relativa a la motivación y conduce a la generación de la clasificación de las medidas recomendadas. En la figura 6.8 se puede observar un ejemplo.

## 6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad

Puntuación final y evaluación	
•	La eficiencia de la construcción ha sido evaluada como <b>aceptable</b> . Las principales razones de este resultado son las siguientes: <ul style="list-style-type: none"><li>○ Las superficies de cristal pueden ser la causa de la dispersión térmica excesiva.</li><li>○ El estado de conservación y mantenimiento de las paredes puede ser pobre.</li><li>○ Las normas de construcción del edificio podrían ser pobres.</li></ul> Las siguientes son algunas recomendaciones: <ul style="list-style-type: none"><li>○ Se recomienda la instalación de ventanas de doble plateado para mejorar el aislamiento térmico.</li><li>○ Mejorar el aislamiento térmico de las paredes expuestas al exterior.</li></ul>
•	La gestión de la construcción ha sido evaluada como <b>pobre</b> . Las principales razones de este resultado son las siguientes: <ul style="list-style-type: none"><li>○ La temperatura de la vivienda ha sido calificada como insatisfactoria por los ocupantes.</li><li>○ El equipamiento instalado no ha cambiado en los últimos 10 años.</li><li>○ El estándar de construcción del edificio podría ser pobre.</li></ul> Las siguientes son algunas recomendaciones: <ul style="list-style-type: none"><li>○ La caldera debe ser reparada.</li><li>○ Se recomienda la instalación de válvulas termostáticas en los terminales.</li></ul>
•	La calidad ambiental de la construcción ha sido evaluada como <b>aceptable</b> . Las principales razones de este resultado son las siguientes: <ul style="list-style-type: none"><li>○ La temperatura de la vivienda ha sido calificada como insatisfactoria por los ocupantes.</li><li>○ El nivel de humedad de la vivienda ha sido considerado insatisfactorio por los ocupantes.</li></ul>
•	El confort acústico ha sido evaluado como <b>bueno</b> .
•	El confort térmico e higrométrico ha sido evaluado como <b>insuficiente</b> .
•	La ventilación ha sido evaluada como <b>aceptable</b> .

**Figura 6.8:** Ejemplo de valoración del sistema BEEPS [De Santoli y Felici, 2005].

Los votos del formulario de la figura 6.6 representan la síntesis inicial de un procedimiento de evaluación complejo. Para su desarrollo, en primer lugar, se genera una muestra de casos de entrenamiento que han sido evaluados por los expertos. Entonces, el peso adecuado para cada votación se estima a partir de técnicas estadísticas que identifican, con el mayor grado posible de precisión, la relación matemática que vincula los votos iniciales a los finales. Estos pesos se utilizan para obtener el certificado final y permiten ofrecer la valoración presentada en el ejemplo de la figura 6.8.

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

---

### 6.5.3 Sistema experto basado en redes neuronales

Anteriormente se realizó un estudio de las redes neuronales, también denominadas modelos conexionistas o sistemas neuromórficos, que son algunos de los nombres que reciben los sistemas artificiales basados en principios de funcionamiento similares a los del cerebro humano.

Estos modelos constan de elementos simples de procesamiento o neuronas, que interactúan entre sí mediante conexiones ponderadas. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas en una red que colabora para producir un estímulo de salida.

Esta metodología ha demostrado ser eficaz en la representación de muchas clases de problemas diferentes. El desarrollo del “aprendizaje” realizado por estos algoritmos permite que mejoren con el tiempo, ya que el número de casos de entrenamiento aumenta, y por tanto el conocimiento de la red.

Las redes neuronales son modelos generalizados adaptados a un problema específico por medio de técnicas de ajuste. Tienen la capacidad de “descubrir” las estructuras de información ocultas en los conjuntos de datos disponibles. Esta característica hace que sea una interesante metodología para su aplicación, dado que este tipo de algoritmos podría aprender de los casos estudiados por los expertos o los auditores respecto de la eficiencia energética de los edificios. En el siguiente apartado se presentan algunos casos.

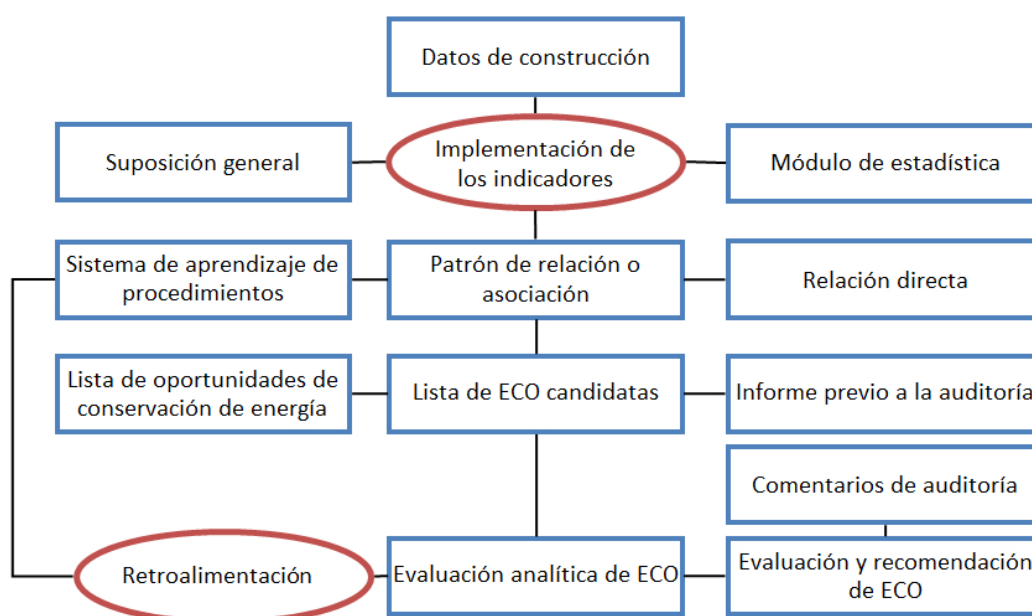
### 6.5.4 Aplicación basada en redes neuronales

Los actuales sistemas no expertos, utilizados como sistemas de construcción de auditorías energéticas, suelen hacer uso de una cantidad considerable de datos de carácter térmico, físico y geométrico con el fin de identificar, por medio de simulaciones matemáticas, los flujos de energía, los niveles de consumo y el ahorro potencial. El acceso a este tipo de información no es fácil y, aún con los conocimientos necesarios en la materia, este enfoque no proporciona ninguna indicación de *Oportunidades de Conservación de Energía* (ECO), ni tampoco una auditoría o las mediciones necesarias durante la visita al sitio por el auditor. Como resultado, el auditor no puede planificar adecuadamente la visita de antemano o evaluar su coste económico y estar seguro de la integridad de la auditoría.

## 6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad

En la actualidad existen otras técnicas como por ejemplo el trabajo presentado por [Caudana et al., 1995] que desarrolla un prototipo de sistema experto para la construcción de las auditorías energéticas denominado BEAMES que utiliza una red neuronal.

BEAMES es un programa orientado al desarrollo de software basado en el conocimiento de la auditoría energética de los edificios. El programa representa una mejora sustancial con respecto a otros métodos de auditoría existentes, ya que permite identificar las ECO para la readaptación de medidas en la fase preliminar. El programa BEAMES utiliza un sistema experto de “gestión” que actúa como un experto humano. El sistema está formado por diferentes módulos funcionales u “objetos” vinculados a la estructura lógica del modelo (figura 6.9). La herramienta elabora conclusiones preliminares y las indicaciones para las fases de la auditoría. La fase previa a la auditoría permite al auditor conocer el nivel de complejidad y coste de la auditoría, además suministra una lista de ECO en las que el auditor puede concentrar su atención permitiendo así desarrollar un plan de medidas apropiadas.



**Figura 6.9:** Estructura lógica del modelo BEAMES [Caudana et al., 1995].

Este resultado se obtiene por medio de un patrón asociado a una red neuronal

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

---

que considera las características del edificio en concreto y compara esta información con la incrustada en un módulo de estadísticas. Este módulo contiene los datos esenciales y los parámetros técnicos de un parque de viviendas de muestra y proporciona los conocimientos básicos del patrón asociado. Una vez que el sistema enumera las ECO probables para el edificio, la herramienta BEAMES proporciona asistencia guiada para:

- Las técnicas de medición.
- Las auditorías de los procedimientos.
- Las técnicas de evaluación o el análisis teniendo en cuenta las opciones en la estrategia de ejecución.

Al comienzo de la auditoría, el sistema permite que una pequeña cantidad de información pueda ser facilitada también por personas no técnicas (por ejemplo, el dueño del edificio o administrador). Esto permite una reducción considerable en el coste junto con la reducción de tiempo en el desarrollo y redacción de informes. La mejora se debe a la generación automática una vez que las medidas de conservación de la energía han sido identificadas.

En el sistema BEAMES las redes neuronales se han utilizado para generar un conjunto detallado de información a partir de datos incompletos suministrados en la fase previa de la auditoría. Ejemplos de estas entradas de la red son: volumen climatizado, año de construcción, tipo de caldera, la edad, el número de viviendas, etc. Estas características de construcción parcial se introducen en la red neuronal a fin de obtener la máxima producción, no sólo las ECO (por ejemplo, el aislamiento de paredes exteriores, la regulación de la tasa de disparo de la caldera, etc.), sino también la desagregación del consumo de energía en varios usos finales, las dimensiones de construcción de los componentes, etc.

En [Caudana et al., 1995] el sistema se aplica en una red neuronal de 3 capas entrenada con un algoritmo de retro-propagación, usando datos reales de edificios en los que se han aplicado ECO. El modelo elabora los resultados de salida (sugerencias) sobre la base de un conocimiento estadístico de las auditorías previas realizadas en el pasado en otros edificios reales. Aun así, esta aplicación no elimina la

## **6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad**

---

necesidad de una “autoridad supervisora”, por ejemplo, un auditor con experiencia que, cada vez, confirme que la información resultante de la operación es razonable y significativa para el edificio en cuestión. Además este supervisor, cuando juzgue una auditoría, debe permitir que sea posible actualizar la base de datos estadística utilizada por la red neuronal sumando todas las auditorías fiables que se han llevado a cabo. Por lo tanto, la herramienta actúa no sólo como una herramienta de formación para los auditores, sino también como un procedimiento de auto-aprendizaje que le permite incluir en su conocimiento todas las mejoras técnicas que se han producido hasta el momento.

Otro ejemplo de estos avances se muestra en la red de programas desarrollados en el Laboratorio Lawrence Berkeley.

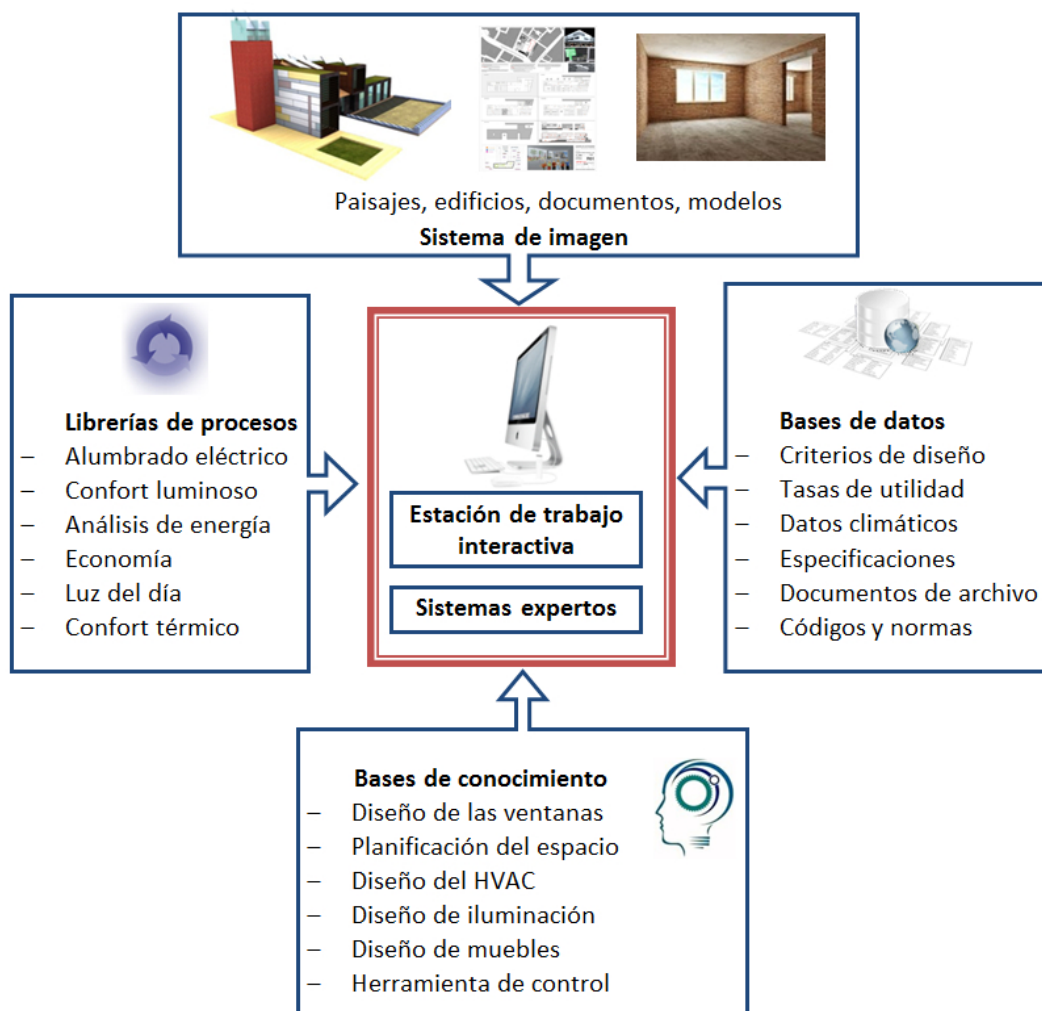
### **6.5.5 Sistema experto basado en AHP**

El Proceso de Jerarquía Analítica (AHP, *Analytic Hierarchy Process*) es una técnica estructurada para tratar con decisiones complejas. En vez de resolver el problema, el AHP ayuda a los decisores a encontrar la solución que mejor se ajusta a sus necesidades y a su comprensión del problema.

El uso de un procedimiento de toma de decisiones implica el conocimiento de una terminología, que se resume a continuación:

- **Objetivo:** es la meta o finalidad que se pretende conseguir con la actividad desarrollada.
- **Alternativas:** son entidades sobre las que se aplican los criterios de evaluación para formar la matriz de decisión.
- **Preferencias:** son valores de peso que asignan los encargados de la decisión a cada uno de los criterios de evaluación. La suma de los pesos de todos los criterios debe de ser la unidad.
- **Reglas de decisión:** constituyen el procedimiento para comparar alternativas.
- **Criterios de evaluación:** son reglas de valoración del cumplimiento de un objetivo. Relacionan el objetivo con atributos evaluables. Pueden ser de dos tipos:

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS



**Figura 6.10:** Desarrollos incluidos en el programa de Lawrence Berkeley Lab.

- Factores: criterios que permiten definirse a favor de una alternativa y en contra de otra.
- Restricciones: criterios condicionados a los valores de los atributos.

En una situación ideal, la información de un determinado criterio puede gobernar una decisión. Sin embargo, en la mayoría de los casos las decisiones implican un equilibrio entre múltiples criterios en los que intervienen un gran número de datos.

Los procedimientos para usar el AHP pueden ser resumidos en:



## 6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad

---

1. Modelar el problema como una jerarquía que contenga el objetivo de la decisión, las alternativas para alcanzarlo, y los criterios para evaluar las alternativas.
2. Establecer prioridades de los elementos de la jerarquía haciendo una serie de juicios basados en comparaciones por pares de elementos. Por ejemplo, cuando se comparan posibles ventanas de un edificio, los auditores pueden decir si ellos prefieren la ubicación sobre el precio, y el precio sobre otra característica.
3. Sintetizar las decisiones para producir un conjunto de prioridades globales de la jerarquía.
4. Revisar la consistencia de las decisiones.
5. Llegar a una decisión final basada en los resultados de este proceso.

En el siguiente apartado se muestra una aplicación del AHP.

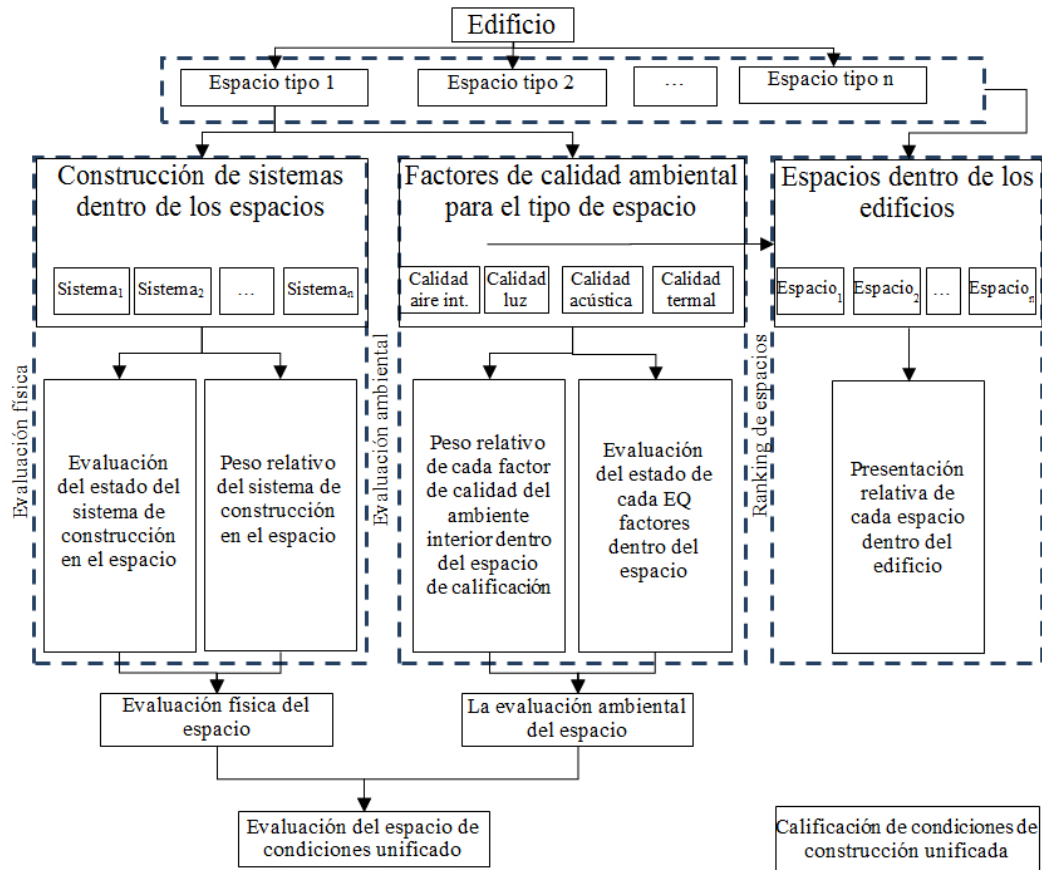
### 6.5.6 Aplicación basada en AHP

Un ejemplo en el que se ha aplicado AHP, es el estudio de [Eweda et al., 2010], que desarrolla un sistema formado por 3 componentes:

- Los espacios dentro del edificio y su clasificación.
- La evaluación física.
- La evaluación ambiental.

La figura 6.11 representa la metodología desarrollada. Un sistema que adopta un SE subjetivo basado en [Saaty, 1996] enfocado como un AHP. En este sistema se han calculado las ponderaciones de cada espacio dentro del edificio, los pesos de cada sistema dentro del tipo de espacio y el peso de cada factor de calidad ambiental en el interior (IEQF, *Indoor Environmental Quality Factor*). El AHP y la técnica SMART (técnicas de asignación de pesos de preferencia para un conjunto

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS



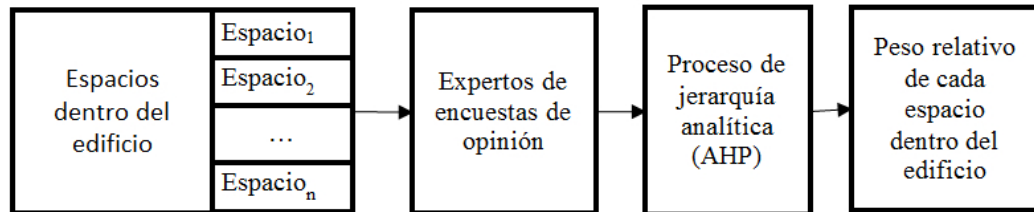
**Figura 6.11:** Metodología de la evaluación del estado [Eweda et al., 2010].

de variables o elementos de valoración) se han combinado desarrollando un modelo integrado de calificación por condición.

Para el sistema, cada tipo de edificio se compone de un cierto número de espacios que representa las diferentes funciones en el interior del edificio,  $B = (SP^1, SP^2, \dots, SP^n)$ . Cada tipo de espacio tiene sus propias características y requisitos. Además cada espacio tiene su propia importancia relativa en comparación con otros (en cada tipo de construcción específica) y de acuerdo a muchos factores, como por ejemplo la función del espacio, el número de ocupantes, la frecuencia y la duración de uso, etc. El estudio de [Eweda et al., 2010] identifica la importancia relativa de cada tipo de espacio dentro de un edificio. Los datos se recogen a partir de una encuesta enviada a los expertos y se analizan mediante la técnica AHP, por la que se calcula el peso o importancia relativa de cada tipo de espacio. La figura

## 6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad

6.12 muestra el proceso de dar prioridad a los espacios.



**Figura 6.12:** El proceso de priorización de los espacios dentro de un edificio [Eweda et al., 2010].

Las investigaciones de [Eweda et al., 2010] remarcan la importancia de los espacios, su identificación y su evaluación para mejorar sus diseños.

### 6.5.7 DSS

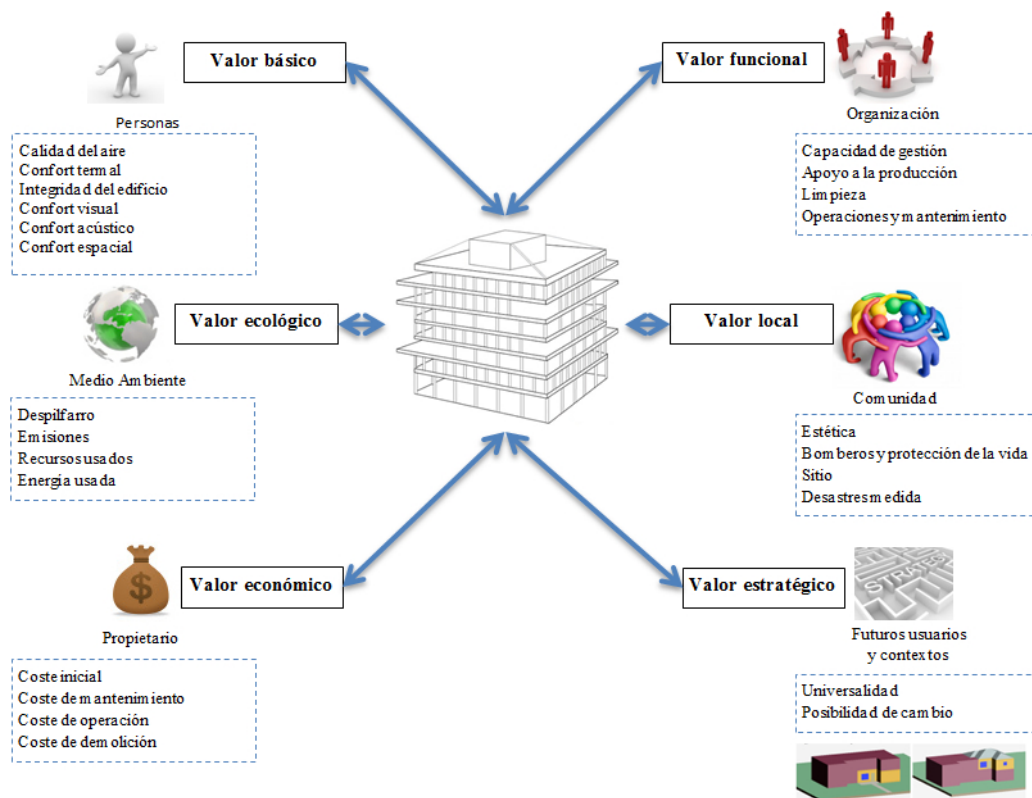
El diseño de los edificios es una tarea de gran complejidad, pues sobre todo en la etapa inicial, un pequeño número de personas se debe encargar de tomar decisiones que tendrán gran repercusión en la situación final del edificio y su eficiencia. Estas decisiones se basan en una información disponible que puede ser incompleta, como puede ser el coste del mantenimiento, el coste del dinero, el coste de la energía, u otros requisitos complejos.

Actualmente los diseños de los edificios tienden a estudiar el impacto de sus decisiones sobre el ciclo de vida de un edificio, este tipo de estudios no es obligatorio aunque si esencial en cualquier proyecto de construcción. Existen investigaciones de actualidad que desarrollan sistemas de ayuda a la toma de decisiones (DSS, Decision Support System) para el ciclo de vida de una construcción, por ejemplo [De Groot et al., 1999].

[De Groot et al., 1999] muestra la importancia de la comunicación en el diseño, un ejemplo dado por el autor destaca que todos los participantes del proyecto deben estar involucrados, y si por ejemplo el arquitecto quiere hacer en su diseño que el edificio tenga un aspecto más transparente, y por tanto, amplía el área de las ventanas en la fachada, esto puede provocar la necesidad de aumentar la capacidad de refrigeración del edificio en verano, por lo cual se debe avisar al ingeniero para el estudio de conflictos de diseño. Además de la mejora de la comunicación

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

el sistema de [De Groot et al., 1999] propone mejoras en la transferencia del conocimiento de las innovaciones y de las fases del ciclo de vida de los edificios, mediante el almacenamiento de las decisiones pasadas. Pues a menudo las decisiones tomadas por los arquitectos sólo se basan en la estética y belleza arquitectónica, sin embargo, estas decisiones suponen en muchos casos un aumento en el coste del edificio, e incluso incomodidades o sobrecostos durante el uso de éste. La planificación y evaluación del diseño de un edificio se basa en información de diseños anteriores, bases de datos de rendimientos y evaluaciones de materiales, etc. Con características específicas que satisfacen las necesidades humanas en base a los distintos niveles de información que afectan al sistema y que se muestran en la figura 6.13.

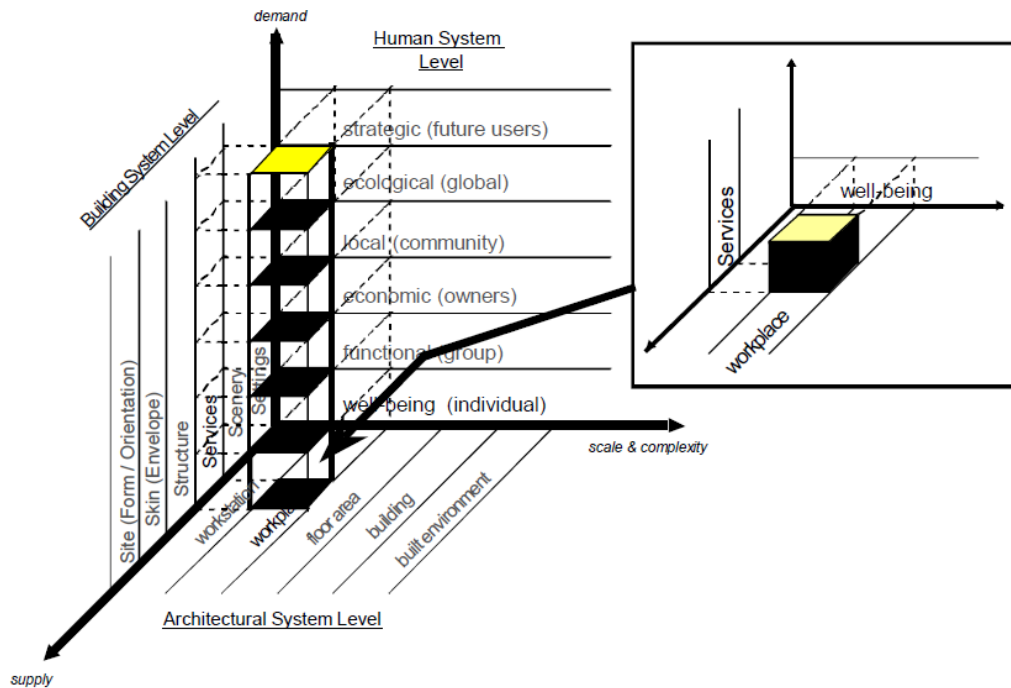


**Figura 6.13:** Niveles de información que afectan al sistema [De Groot et al., 1999].

La complejidad de las decisiones de diseño de un edificio, afectan a diferentes subsistemas o sub-decisiones que se reflejan el esquema de [Hill, 1997], este pre-

## 6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad

senta un modelo que describe de manera tridimensional el diseño de un edificio, que se compone de decisiones a nivel de arquitectura, decisiones a nivel de construcción y decisiones a nivel de las demandas de los ocupantes, ya sean estratégicas, ecológicas o de bienestar como se muestra en la figura 6.14.



**Figura 6.14:** Representación de la complejidad de las decisiones en el diseño de un edificio [Hill, 1997].

En 2008 el gobierno británico planteó un ambicioso compromiso de reducción del  $CO_2$ , ya que los edificios suponen el 40 % del  $CO_2$  en Reino Unido. En ese marco político, investigadores como [Loh et al., 2010] están desarrollando sistemas DSS que permitan incluir los requisitos energéticos en las fases iniciales de los proyectos, siguiendo las normativas existentes.

Entre otros proyectos existe el proyecto EIPRO (Impacto ambiental de los productos), que analiza los impactos del ciclo de vida en el medio ambiente relacionados al consumo final. En este trabajo se observa que la ocupación en la construcción y la estructura constituyen el 20 % y el 35 % del impacto en el medio ambiente de todos los productos. En 2008, el proyecto INPRO-Building demostró que las mayores oportunidades de rentabilizar la energía están en las primeras etapas del proceso

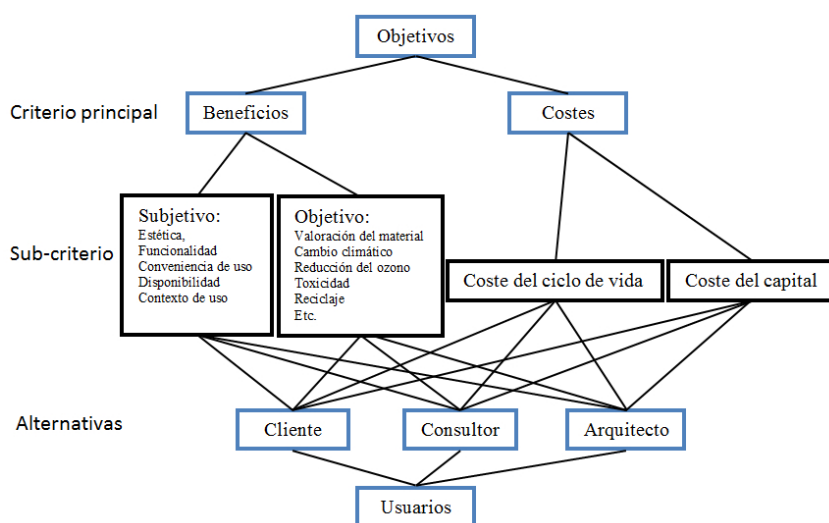
## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

de diseño en las nuevas construcciones y en las reformas de edificios [Schlueter y Thesseling, 2009].

Sin embargo, un aspecto crítico de la toma de decisiones está en que los interesados no sólo interpretan y toman decisiones basadas en juicios de expertos, sino que también necesitan involucrarse adecuadamente con todas las partes interesadas en la decisión [Loh et al., 2009].

Otra herramienta es el EATT [Loh et al., 2008], se centra en la selección de los materiales utilizados en la construcción de edificios. Esto se debe a que los materiales de construcción tienen un impacto significativo en la creación del rendimiento del ciclo de vida.

En [Loh et al., 2010] se puede observar un conjunto de herramientas de datos para la construcción, las simulaciones energéticas, ambientales, evaluaciones del ciclo y de su coste. Además se presentan directrices, diseños, criterios, arquitecturas, etc. La figura 6.15 muestra la relación entre criterios y usuarios.



**Figura 6.15:** Relación entre criterios y usuarios [Loh et al., 2010].

[Gu et al., 1999] presenta un DSS que orienta en el cumplimiento del código de edificación de Canadá, el sistema comprueba el diseño de la envolvente exterior de un edificio y asesora en la mejora del diseño del edificio según el código. Este tipo de sistemas de conocimiento permiten contener un conjunto de reglas que indiquen si un diseño es aceptado o no, las reglas tienen independencia de la base de

## **6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad**

---

conocimiento de piezas o materiales que se le proporcionen al sistema. El sistema permite obtener el conocimiento utilizado para generar la solución y explicar cómo se obtiene la conclusión. También se utiliza para proporcionar asesoramiento sobre cómo mejorar el diseño y para entender mejor los requisitos del código.

En el sistema de [Gu et al., 1999], se enlaza la información del diseño del edificio (AutoCAD) con su sistema, en este sistema se estudian los diferentes tipos de construcción, con elementos de construcción tales como ventanas, paredes o suelos que se definen a través de:

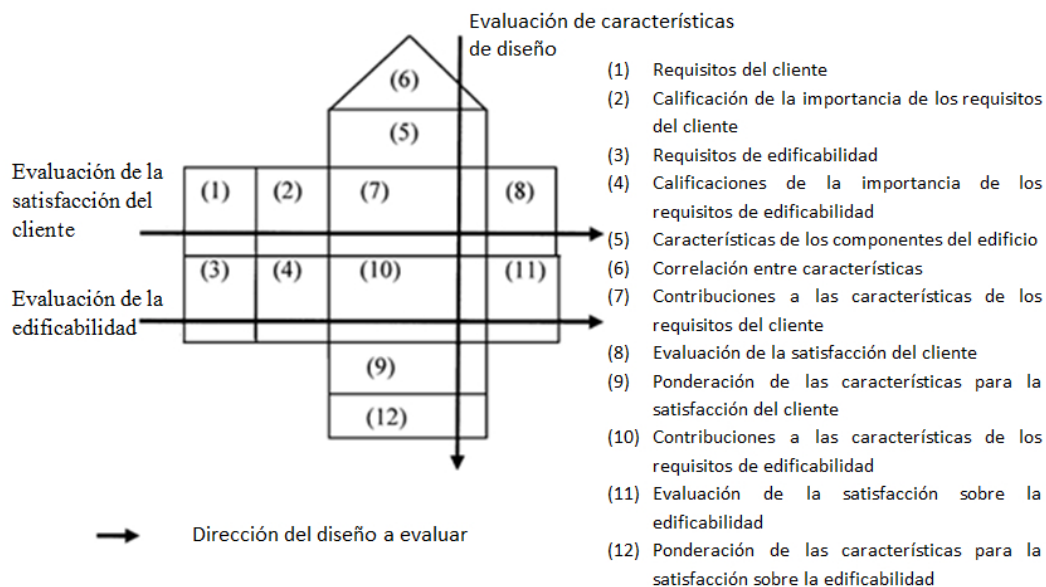
- Las ventanas y otras superficies acristaladas.
- Las paredes por encima de nivel del suelo.
- Las paredes debajo del nivel del suelo.
- Los suelos sobre el nivel del suelo.
- Los pisos en contacto con el suelo.
- Los techos.
- Las puertas exteriores.
- El exterior.
- El sistema de iluminación de interiores.

Junto con el diseño, todos los sistemas de decisión sobre el diseño de edificios, necesitan de datos específicos de edificación, como por ejemplo: La tasa de infiltración de aire que permite calcular el impacto global.

En [Yang et al., 2003b] se puede estudiar el desarrollo de un sistema difuso que implementa una función sobre la calidad en los diseños edificables. Este sistema se utilizaba para la toma de decisiones sobre elementos de construcción. El problema de toma de decisión de [Yang et al., 2003b] se resume en tres componentes de decisión, cada una abordada desde un grupo de personas que tomaban parte en el diseño:

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

- En este sistema el cliente es participante y promotor del diseño edificable. El cliente genera demandas desde el principio del diseño, y espera una alta calidad del servicio para satisfacer sus requisitos y obtener el valor económico real de su inversión.
- Los diseñadores reciben la información del diseño y requisitos del cliente, así como las aportaciones de los profesionales de la construcción que deben participar en la creación de diseños edificables.
- Los contratistas utilizan los productos de los diseñadores para construir la instalación junto con el conocimiento y experiencia personal. Ellos contribuyen con sus conocimientos y experiencias en diferentes aspectos, por ejemplo, los métodos de construcción alternativos, con los que ayudan a optimizar el diseño, facilitar la construcción y obtener beneficios.



**Figura 6.16:** HOQBD [Yang et al., 2003b].

Para abordar el problema se aplica el modelo HOQBD (Casa de calidad para modelos o diseños edificables - *House of Quality for Buildable Designs*) que se muestra en la figura 6.16. El modelo se aplica para satisfacer las necesidades de los diseños, puesto que los participantes a menudo tienen percepciones contradictorias



## **6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad**

---

sobre los problemas de diseño y sus soluciones correspondientes. Sin embargo, mediante la implementación de una función de calidad los participantes se ven obligados a lograr un consenso, la teoría de conjuntos difusos está integrada en la función de calidad para capturar la inherente falta de claridad y los conflictos de diseño de los edificios.

El modelo HOQBD para los diseños, presenta:

- Requisitos del cliente, de edificabilidad y sus calificaciones.
- Los clientes y sus necesidades de diseños edificable.
- Características de los elementos de construcción y correlaciones.
- Las contribuciones de las características en el cliente, requisitos y necesidades de edificabilidad.
- Evaluación de la satisfacción del cliente.
- Coeficientes de las características de los requisitos del cliente y de edificabilidad.

[Yang et al., 2003b] aplican a esta información la lógica difusa, para dar soluciones en términos lingüísticos y no únicamente valores numéricos.

Al igual que la lógica difusa, otros autores aplican otras meta-heurísticas en sus diseños de DSS. El trabajo de [Rafiq et al., 2003] aplica un algoritmo genético, su sistema permite investigar simultáneamente diseños que utilizan diferentes configuraciones, métodos constructivos y materiales. Las funciones de coste utilizadas estudian la idoneidad de los diferentes conceptos de diseño considerado el coste económico de la construcción y la renta de los ingresos previstos dentro de la vida útil del edificio. La evaluación del coste de la solución puede ser adaptada para reflejar los costes del ciclo de vida mediante la introducción de información del mantenimiento y de los costes de funcionamiento en el modelo de costes. Este modelo también tiene en cuenta los costes asociados a la consultoría, la investigación, los préstamos, pagos y tasas de interés.

En cambio [Mardjono, 2002] aplica un DSS al diseño de edificios con un material específico, el bambú. Este material de construcción puede integrarse en el proceso de diseño, su sistema ofrecer a los diseñadores un medio de resolución durante

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

---

el diseño del proceso en términos de, por ejemplo, hipótesis, criterios, alternativas y soluciones aceptables. El sistema es esencial debido a que el conocimiento de la aplicación de este material es desconocido en países no productores de bambú. Parece lógico preguntarse en este ejemplo ¿Cuál es la relación entre el sistema de construcción con bambú y un DSS en el proceso de diseño? La toma de decisiones en el proceso de diseño es un paso de integración de todo el sistema donde las condiciones de entorno deben estar presentes. Este proceso conlleva la obtención de información, la evaluación, explicación, cálculo de las características técnicas, el coste de cálculo de cada componente o subsistema en cada solución alternativa que sea propuesta. Para ello se selecciona un ejemplo de una solución anterior que cumpla los criterios del caso de estudio. Cabe señalar que la implantación de las directivas de seguridad no depende del tipo apropiado de sistema de construcción con bambú en este caso, sino de la capacidad del usuario en el acceso al sistema de información. Debe quedar claro que sin las adecuadas capacidades de los usuarios las investigaciones existentes en la literatura carecen de efectividad.

Al igual que los estudios citados existen otros ejemplos. [Malkawi y Srinivasan, 2007] presentó un DSS para la gestión de instalaciones que aumenta la eficacia y el ahorro a largo plazo, ellos mostraron por ejemplo ahorros de energía mediante la aplicación de diferentes ventanas, aplicando la minería web, sistemas con una base de conocimiento e integrando simulaciones, etc. [Jaksch y Rudy, 2005] desarrollaron un DSS para las fases iniciales del diseño arquitectónico de un edificio en el estudio de cargas.

### 6.5.8 La importancia de los datos para los SE

La existencia de datos como base para generar un SE es uno de los puntos de mayor interés. Un ejemplo importante de investigación es el proyecto DATAMINE, que demuestra la importancia de una gestión eficiente de los certificados de eficiencia energética para que los edificios consigan el reto de implementar con éxito el esquema de certificación en España.

Dicha gestión se fundamenta en tres principios esenciales:

1. La creación de una base de datos que constituya toda la información existente a partir de los certificados de eficiencia energética de edificios nuevos.

## **6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad**

---

2. La elección de un método para la recolección de certificados, la posterior transferencia de información a la base de datos y la automatización para optimizar los recursos de personal y tiempo.
3. El análisis de la base de datos para el estudio de la información que se desee obtener:
  - Seguimiento temporal del proceso.
  - Monitorización (información instantánea).
  - Inspección y control de cada certificado.
  - Detección de fraudes.
  - Esquema de subvenciones.
  - Planificación de estrategias de ahorro.
  - Evaluación del impacto de las nuevas regulaciones.

Es importante destacar que tanto la base de datos, como el conjunto del proyecto DATAMINE [Loga y Diefenbach, 2009], se han desarrollado de forma abierta para poder adaptarse tanto al inminente esquema de certificación de edificios existentes, como a futuros cambios en las regulaciones nacionales.

Los investigadores de este proyecto recomiendan utilizar una base de datos de estructura predefinida como DATAMINE. Su estructura estandarizada permite realizar estudios de implementación en la certificación de la eficiencia energética de edificios. Además, el sistema permite:

- Presentar los resultados sobre el estado de la implementación de la certificación utilizando una herramienta desarrollada a nivel europeo.
- La comparación entre regiones de un mismo país.
- La comparación entre diferentes países.
- La comparación entre regiones de distintos países pero con condiciones climáticas similares.

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

---

Existen otros ejemplos en la literatura como el estudio griego de recopilación y análisis de los edificios y su energía [Dascalaki et al., 2010]. Este estudio presenta la oportunidad de explotar la información de los certificados de eficiencia energética (EPC, *Energy Performance Certificates*) y los informes nacionales de la construcción de las auditorías energéticas, inspección de calderas y sistemas de aire acondicionado que se mantienen en bases de datos establecidas a nivel nacional. Dascalaki propone que esa base de datos pueda ser utilizada por los interesados y responsables técnicos, que son quienes supervisan una serie de edificios, para recoger, organizar y analizar los datos pertinentes. De esta forma se podría mejorar la construcción y supervisión de la eficiencia energética de éstos.

En todos los casos, recopilar y organizar los datos necesarios permite descubrir información clave para el acceso y la mejora de los edificios. En el caso heleno, la base de datos incluye un total de 255 parámetros que abarcan un rango amplio y realista de características del edificio como se observa en la figura 6.17.

En general, la metodología (base de datos y herramientas) es lo suficientemente flexible para ser utilizada por los administradores de edificios. Esta permite recoger y analizar los datos pertinentes a fin de supervisar el rendimiento energético de sus edificios y el rango de sus prioridades respecto de las medidas relacionadas con la energía. Por ejemplo, la metodología permite comparar el impacto sobre el rendimiento energético de los edificios con el uso de diferentes elementos de calefacción, refrigeración, sistemas de ventilación, equipos, controles, ajustes de temperatura o la iluminación instalada respecto de la energía. En todos los casos, la recogida y la organización de los datos necesarios es el primer paso que permite obtener información clave para la mejora de los edificios.

Por tanto, en las futuras investigaciones sobre el diseño y desarrollo de edificios, las estructuras y el almacenamiento de los datos para su relación mediante otras técnicas será la pieza clave.

### 6.5.9 Aplicaciones de software no experto

Generalmente, el desarrollo de programas específicos, para la resolución de tareas complejas, se suele realizar de forma privada y por encargo a una empresa de software, con la intención de incrementar la productividad y competitividad de

## 6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad

<p><b>1. Datos del certificado de energía</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Edificio o parte de un edificio</li> <li>• Fecha</li> <li>• Certificación de software</li> <li>• Cualificación del consultor</li> <li>• Datos de calidad</li> <li>• Código propuesto en las medidas de conservación de energía</li> <li>• Puntos de referencia / certificado de clasificación</li> </ul> <p><b>2. Datos generales de la construcción</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ubicación</li> <li>• Zona climática</li> <li>• Año de construcción</li> <li>• Usos finales</li> <li>• Superficie acondicionada</li> <li>• Volumen acondicionado</li> <li>• Número de pisos y apartamentos</li> <li>• Edificios vecinos</li> <li>• Cubierta de calidad ambiental</li> </ul> <p><b>3. La envolvente del edificio</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Coeficiente global de transferencia de calor</li> <li>• Puentes térmicos</li> <li>• Áreas opacas y valores de U</li> <li>• Áreas transparentes, orientación y valores de "U"</li> <li>• Sistemas de sombreado</li> </ul> <p><b>4. Sistemas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Producción de calor para la calefacción y servicio de agua caliente</li> <li>• Ventilación mecánica: Aire acondicionado y refrigeración, tipo, fecha de instalación, eficiencia, energía, calefacción, controles, ajustes de temperatura, pérdidas de distribución, entrega</li> <li>• Eficiencia de la bomba / ventilador</li> <li>• Iluminación (potencia instalada, iluminación, controles)</li> </ul>	<p><b>5. Valoración de activos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Referenciales de la metodología</li> <li>• Índice de clima</li> <li>• Demanda de energía térmica</li> <li>• Refrigeración y aire acondicionado (bruto, pérdidas de distribución, almacenamiento, energía de entrada / salida)</li> <li>• Iluminación y demanda de energía eléctrica</li> <li>• Cogeneración y otra generación de energía</li> </ul> <p><b>6. Operativo de calificación</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Referenciales de la metodología</li> <li>• Periodo de las mediciones</li> <li>• Índice de clima</li> <li>• Calefacción/demanda de energía</li> <li>• Refrigeración y aire acondicionado, pérdidas de distribución, almacenamiento, energía de entrada/salida</li> <li>• Iluminación y demanda de energía eléctrica</li> <li>• Generación de energía</li> </ul> <p><b>7. Resumen del consumo de energía – generación</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eléctrica</li> <li>• Térmica</li> <li>• Otros</li> <li>• Generación de energía externa</li> </ul> <p>Calculo, medidas y usos finales.</p> <p><b>8. Energía primaria - emisiones de CO<sub>2</sub></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Métodos de cálculo</li> <li>• Demanda de energía primaria y usos</li> <li>• Emisiones y usos</li> <li>• Puntos de referencia</li> </ul>
--	---

**Figura 6.17:** Estructura principal de la base de datos DATAMINE [Loga y Diefenbach, 2009].

una empresa. En excepciones como ésta, los programas son desarrollados con fi-

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

---

nes públicos, para ayudar a generar beneficios sociales y competitivos en un país o región.

La simulación de edificios, en su apartado energético surge de forma significativa con el programa DOE2 [York y Tucker, 1980], tras una constante, aunque lenta inversión de la administración de los EE.UU.

En el programa DOE2 y en su motor de cálculo, se basan otros programas posteriores como es el caso de LIDER en España. En la misma época que DOE2, surge BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*, EE.UU.). Más adelante, nace el programa Energy-Plus, que toma lo mejor de DOE2 y BLAST. Otro programa destacado es TRNSYS (*Transient Simulation of Systems*) de la Universidad de Wisconsin-Madison (EE.UU.) y desarrollado con un carácter más universitario que profesional.

Para la limitación de la demanda energética, en España, el programa oficial es LIDER, programa informático promovido por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, a través del IDAE, y por el Ministerio de Vivienda, que permite verificar las exigencias del Documento Básico DB-HE1: Limitación de la Demanda Energética. Además de este software, se pueden emplear programas como ARKILIDER, programa que funciona integrado dentro del programa AutoCAD, permite verificar la exigencia de limitación de demanda energética (DB-HE1). Aun así, también existe el programa vpLIDERCAD que pasa la definición geométrica constructiva de AutoCAD a LIDER. Otros programas como CYPE-CTE, fue desarrollado para verificar el cumplimiento de la Exigencia básica HE 1, mediante la opción simplificada o mediante la opción general.

### 6.5.9.1 Herramientas de evaluación del comportamiento energético

Existen herramientas que permiten obtener una visión global de la edificación, junto con aspectos como: la ventilación, la iluminación, las pérdidas térmicas, etc. Al tratarse de simulaciones, estas herramientas permiten calcular de manera exacta el comportamiento energético del edificio que pueden ser modificados por el usuario con el fin de reducir el impacto asociado al consumo de energía del edificio.

Las herramientas permiten la modelización o realización de un boceto del edificio a partir de los datos introducidos, como características de los materiales, sistemas constructivos o del propio edificio. A partir del modelo y la configuración se

## **6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad**

---

construye un modelo 3D, de mayor o menor complejidad y detalle, que representa al edificio. A partir de la creación de dicho modelo virtual, la asignación de las características de materiales, sistemas y edificio, permitirán evaluar el mismo. Los mayores inconvenientes en estas herramientas, se deben a la falta de mejoras en las bases de datos que dan soporte a estas herramientas y a la integración de las mismas con otras herramientas informáticas de diseño asistido por ordenador (CAD).

El software de evaluación del comportamiento energético más reconocido en España es CALENER [CALENER, 2013], que incorpora la herramienta LIDER, y es también un programa informático promovido por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, a través del IDAE, y por el Ministerio de Vivienda, que permite determinar el nivel de eficiencia energética correspondiente a un edificio. El programa consta de dos herramientas informáticas para una utilización más fácil por el usuario: CALENER VYP y CALENER GT.

Dentro del sector, existen otros programas de simulación térmica.

- ENERGY PLUS [PLUS, 2013], es un programa de simulación energética de calefacción, refrigeración, iluminación, ventilación y otros flujos energéticos en edificios. Este software es capaz de realizar simulaciones muy innovadoras tales como pasos de simulación inferiores a una hora, sistemas modulares y plantas integradas con balance basados en zonas, flujos de aire multizona, confort térmico y sistemas fotovoltaicos, etc.
- HAP [HAP, 2013], para el cálculo de demandas de calefacción y refrigeración mediante el cálculo de consumos, que permite el dimensionado de sistemas de climatización y ventilación, junto con la estimación del coste y consumo energético del edificio.
- HvacCad, que incluye un nuevo módulo “CTE”, el cual permite cumplir con las exigencias establecidas en el DB-HE. El más avanzado instrumento para la proyección termotécnica e hidráulica compatible con AutoCAD.
- TAS, programa para el estudio del comportamiento térmico estacional del edificio. También realiza la estimación del impacto solar y proyección de sombras. El análisis del comportamiento térmico de fachadas, vidrio, etc. o

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

---

el análisis de condiciones térmicas en zona interior. Estimación de temperaturas, humedades relativas, cargas térmicas, sensibles y latentes.

- TRNSYS [TRNSYS, 2013], programa de pago que permite la simulación energética, cálculo de cargas, consumo del edificio, energías renovables y tecnologías emergentes.
- DesignBuilder [BUILDER, 2013], programa de pago que permite la modelización de edificios, y la evaluación del consumo energético, las emisiones de  $CO_2$  asociadas y su comportamiento lumínico. Para la evaluación térmica, emplea el motor del software Energy Plus.
- Ecotect [ECOTECT, 2013], es una herramienta de pago que proporciona una interfaz para edificios que facilita la información y cálculo relativo a la captación solar, comportamiento térmico, iluminación, acústica y análisis del coste.
- EPS-r [EPS-r, 2013], es un programa que permite simular dinámicamente el comportamiento energético de una vivienda o construcción, lo cual permite verificar en fase de diseño las cargas térmicas, tanto de calefacción como de refrigeración.

### 6.5.9.2 Herramientas de evaluación ambiental basadas en análisis del ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida de un edificio requiere de la realización de un inventario de materiales, componentes y del propio edificio. Por lo que se requiere una gran cantidad de información. Algunos de los datos son difíciles de predecir hasta la propia ejecución del proyecto. Sin embargo, pueden ser aproximados y utilizados para asistir al usuario. Estas herramientas simplifican los cálculos que conducen a la obtención del CCV de un edificio, y algunos de ellos permiten la introducción de datos básicos (superficies o sistemas básicos) de tal manera que efectivamente sirvan a su fin de asesoramiento del proyecto. Estos programas permiten, simular cual va a ser el comportamiento ambiental del edificio a lo largo de todo su ciclo de vida. Ello se obtiene gracias a las diferentes bases de datos de las que disponen,



## **6.5 Estado del arte de los SE en el diseño y desarrollo de edificios: Métodos aplicados con anterioridad**

---

en las que son recogidas las condiciones climáticas y la relación entre materiales, soluciones constructivas e impacto ambiental. Las más conocidas son:

- ATHENA [ATHENA, 2013] (de pago), desarrollada por el ATHENA Institute de Canadá. Evalúa el impacto ambiental de un edificio basándose en la metodología de análisis del CCV, pero sin que sea necesario tener conocimientos específicos de cómo es realizado dicho análisis. No permite simular el consumo energético durante la etapa de uso del edificio (si bien acepta datos de simulaciones realizadas con otras herramientas). El programa tiene en consideración los siguientes aspectos: La fabricación del material, incluyendo la extracción de materia prima y el contenido en materiales reciclados, el transporte, la construcción in-situ, las variaciones en el uso de energía, transporte y otros factores debidas a características regionales, el tipo del edificio y vida útil prevista, efectos derivados del mantenimiento, reparaciones y recambios, la demolición y eliminación, y las emisiones derivadas de la fase de uso del edificio. El mayor inconveniente de esta aplicación es que su BD no permite incorporar más materiales, componentes o datos de zonas climáticas.
- BEES [BEES, 2013], desarrollada en EEUU, es una herramienta de evaluación basada en la metodología análisis del ciclo de vida (ISO 14040). El sistema permite evaluar tanto el impacto ambiental como los costes económicos asociados al ciclo de vida de los materiales empleados en el edificio (extracción de materia prima, fabricación, transporte, instalación, uso y por último reciclado y gestión de los residuos generados). Además, incluye el coste de la inversión inicial, el coste de reemplazo, de funcionamiento, de mantenimiento, de las reparaciones y de la eliminación.
- ECO-QUANTUM [ECO-QUANTUM, 2013], de origen holandés, esta herramienta evalúa el impacto en edificio desde la extracción de materiales hasta la demolición o reutilización y reciclaje de los materiales.
- ENVEST2 [ENVEST2, 2013], herramienta utilizada en Reino Unido para estimar los impactos de los edificios desde las primeras etapas de diseño. Esta herramienta considera los impactos ambientales tanto de los materiales empleados en la construcción del edificio como la energía y los consumos

## 6. DISEÑO Y DESARROLLO DE EDIFICIOS

---

que son realizados en el edificio durante su vida útil. Es capaz de identificar instantáneamente aquellos aspectos del edificio que tienen la mayor influencia sobre su impacto global, y asimismo, analizar el coste de ciclo de vida. Los impactos ambientales son medidos en Ecopuntos, permitiendo a los diseñadores establecer comparaciones entre distintos diseños.

- LISA [LISA, 2013], es un software utilizado en Australia, para evaluar los impactos ambientales asociados a un edificio durante todo su ciclo de vida y desde la fase de diseño. Las diferentes tipologías de edificación que son evaluables con este método son las oficinas y viviendas en altura. La introducción de datos se realiza mediante la elección de los materiales, sistemas y productos empleados, por paneles desplegables desde un listado de materiales. Los resultados obtenidos son expresados en forma de gráficos y tablas.

### 6.6 Conclusiones

En el presente capítulo, introductorio de las técnicas aplicadas al diseño y desarrollo de edificios. Se ha presentado una visión general de proyectos de relativo interés para la tesis, por la aplicación de conceptos como sistema experto, lógica difusa, redes neuronales y, además en el bloque anterior se han clasificado y se han presentado el conjunto de meta-heurísticas aplicadas en este bloque. Además, se ha profundizado en aquellas meta-heurísticas que son aplicadas en la propia tesis, o por otros investigadores en investigaciones de interés que han sido mencionadas en este bloque. Un breve resumen de las herramientas de software actuales se ha presentado, pese a no ser software de ayuda a la toma de decisiones, por no permitir comparar elementos, ni permitir obtener soluciones óptimas. Además, como se ha podido observar, los sistemas expertos y de ayuda a la toma de decisiones mezclan diferentes técnicas para conseguir sus objetivos. Del estudio se destaca la necesidad de aplicar la metodología y aplicación que se presenta en esta tesis. Además, se puede destacar que no existe ningún software de análisis del ciclo de vida que incorpore el cálculo de demandas junto al CCV. Por lo que sería interesante para añadir a las herramientas existentes, ya que no existe ninguna aplicación española

que implemente el estándar de análisis del coste del ciclo de vida. Dicha herramienta de análisis, necesitaría incorporar el estudio del CCV y la metodología que se presenta en el capítulo 8 como parte del análisis del ciclo de vida.



*Si todo el mundo consumiera la misma cantidad de energía que absorben los países ricos, necesitaríamos cuatro planetas más como la Tierra para sobrevivir. El problema está en que los humanos -al contrario que las hormigas, las termitas o las abejas- no funcionamos como un super organismo solidario.*

Edward O. Wilson (biólogo)

CAPITULO

# 7

## Edificios de alta calificación energética

El cálculo de la demanda energética en los edificios es la base de partida para determinar el consumo energético de las instalaciones que éstos contienen. Conocer el consumo permite establecer comparaciones, en términos de rentabilidad energética y económica.

La rentabilidad de una construcción no sólo es medida en base a su inversión inicial, sino también al coste de uso en los años posteriores. La inversión inicial afecta al coste de vida del edificio, ya que el desarrollo de soluciones térmicas que aumenten el confort del edificio, permiten la disminución del consumo, y la utilización óptima de la energía. Con este propósito, se pretende seleccionar el tipo, orientación y espesor de los aislamientos del edificio, la selección de acristalamientos u otros elementos pasivos.

La revisión bibliográfica del capítulo 6, pone de manifiesto la existencia de diversos sistemas que ayudan a resolver los cálculos necesarios respecto a las edificaciones. Sin embargo, no se han observado sistemas expertos que ayuden a la selección de los elementos constructivos para alcanzar la más alta calificación energética posible.

## 7. EDIFICIOS DE ALTA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA

---

El objetivo del presente bloque de la tesis es desarrollar una metodología e implementar un sistema, capaz de resolver el problema mediante un sistema experto. Con este objetivo, el presente capítulo introduce a la temática y normativa del problema que se va a analizar.

### 7.1 Análisis del problema: elementos de estudio

La determinación de la demanda energética de un edificio, pasa por conocer el estado térmico definido por un recinto. Todo elemento constructivo tiene un estado térmico que es resultado de la acción simultánea de distintos flujos de calor que concurren en el mismo. Desde el exterior, los edificios se ven afectados principalmente por la radiación solar, la temperatura del aire exterior y la temperatura de otros elementos constructivos a su alrededor. Desde el interior, se ven afectados por la energía liberada por los ocupantes, la iluminación o el efecto de diversos equipos que generan en mayor o menor medida un flujo de calor.

Como consecuencia, a través de diversos elementos constructivos se generan los siguientes flujos de calor. La tesis de Álvarez [Álvarez, 1986] permite conocer más sobre los flujos de calor y metodologías desarrolladas previamente. Para poder analizar el problema, se realiza una breve descripción o introducción de las variables que componen el problema y sus efectos.

La calificación energética de un edificio depende de la **climatología**, del **edificio**, de los elementos constructivos de éste, y del **sistema de climatización**.

#### 7.1.1 Climatología

La calificación energética entre los edificios varía dependiendo de los diferentes escenarios debido a las características de su clima, respecto a los periodos fríos y cálidos.

En España, se contemplan las siguientes zonas climáticas:

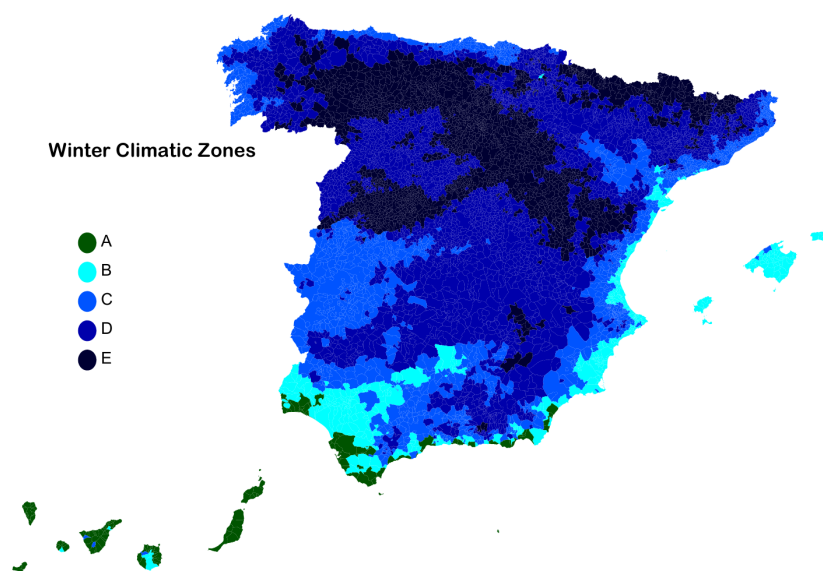
**A3, A4, B3, B4, C1, C2, C3, C4, D1, D2, D3, E1**

Estas zonas climáticas son utilizadas en la metodología y programa diseñado.

## 7.1 Análisis del problema: elementos de estudio

Las zonas climáticas de todos los municipios de España se encuentran indicadas en el documento de apoyo al documento básico DB-HE, que presenta la zonificación climática en función de la radiación solar global media diaria anual [Ministerio de Fomento, 2011].

Aun así, se puede determinar una zona climática utilizando registros climáticos contrastados. Como se observa en el mapa de España de la figura 7.1, las zonas climáticas de invierno se nombran mediante una letra (véase tabla 7.1), que se determinan a partir del cálculo de las *Severidades Climáticas de Invierno* (SCI).



**Figura 7.1:** Mapa de severidades climáticas españolas en invierno [Maldonado, 2010].

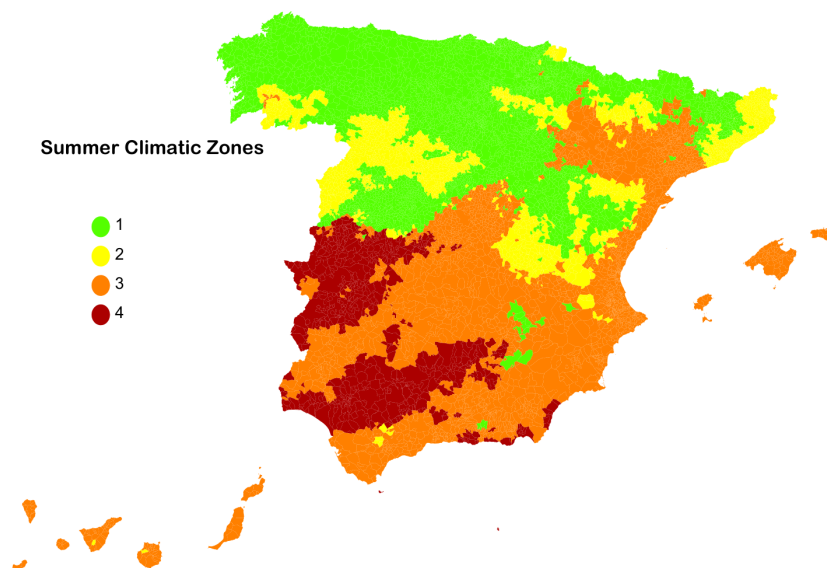
**Tabla 7.1:** Severidad climática invierno.

Letra	SCI
A	$SCI \leq 0,3$
B	$0,3 < SCI \leq 0,6$
C	$0,6 < SCI \leq 0,95$
D	$0,95 < SCI \leq 1,3$
E	$SCI > 1,3$

De igual forma, en la figura 7.2 se observan las zonas climáticas en la temporada de verano, en éste, las zonas climáticas se nombran mediante un número

## 7. EDIFICIOS DE ALTA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA

(véase tabla 7.2), que se determina a partir de las *Severidades Climáticas de Verano* (SCV).



**Figura 7.2:** Mapa de severidades climáticas españolas en verano [Maldonado, 2010].

**Tabla 7.2:** Severidad climática verano.

Número	SCV
1	$SCV \leq 0,6$
2	$0,6 < SCV \leq 0,9$
3	$0,9 < SCV \leq 1,25$
4	$SCV > 1,25$

La severidad climática es un cálculo que combina los grados-día y la radiación solar de una localidad. Así, si dos localidades tienen la misma SCI (o SCV), la demanda energética de calefacción (refrigeración) de un edificio construido en ambas será la misma.

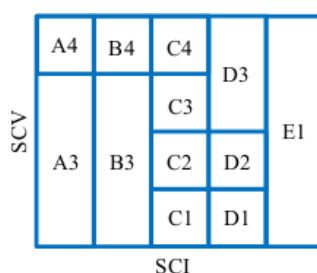
La nomenclatura aplicada a las zonas climáticas, compuesta por una letra y un número, hace referencia a la severidad climática, de forma que la letra A indica que el invierno es menos frío o más suave, y la E que es más frío o severo, y por tanto la demanda energética será mayor. Respecto al verano, el número 1 indica que el



## 7.1 Análisis del problema: elementos de estudio

verano es más suave o con menos calor, y el 4 hace referencia a un verano caluroso, y como consecuencia la necesidad de refrigeración es mayor.

La combinación de las 5 clasificaciones de invierno con las 4 de verano, contribuye a la creación de 20 zonas climáticas distintas de las cuales en España sólo se contemplan las 12 mostradas en la figura 7.3.



**Figura 7.3:** Tipos de zonas climáticas españolas.

### 7.1.2 Edificios y descripción de las tipologías arquitectónicas básicas para el estudio

La calificación energética depende del edificio en términos de su demanda de calefacción, refrigeración y del ACS. Esta puede ser estudiada en términos absolutos de forma estacional, o en un rango de frecuencia de horas o días. O en términos de carga, que depende de su ubicación, su construcción y del diseño de este. [Salmerón, 2011] presenta una distinción de tipologías edificatorias básicas a través del análisis de la posición del edificio en la parcela. Basado en la premisa de que cada parcela contiene un edificio, se pueden presentar diversos escenarios, donde el edificio y su parcela ocupan toda la manzana o la parcela se encuentra anexa a una o varias parcelas.

Existen varias posibilidades de localización en diferentes situaciones:

**Aislada** Si la parcela ocupa toda la manzana, la única posibilidad es que el bloque o la vivienda unifamiliar sean aisladas, y por tanto, tenga sus cuatro orientaciones principales.

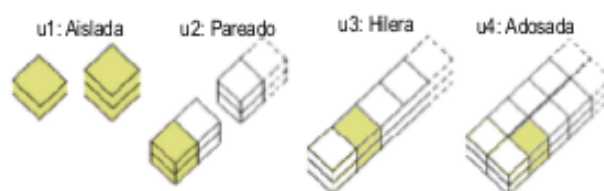
**Pareada** Dos parcelas por manzana, donde cada una es cabecera de la manzana, es decir, mantiene tres orientaciones principales exteriores.

## 7. EDIFICIOS DE ALTA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA

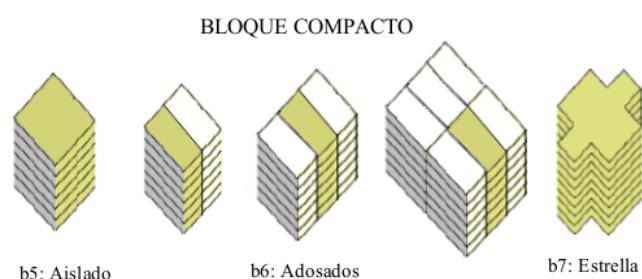
---

**Hilera** Más de dos parcelas por manzana, donde la parcela puede ser cabecera de la manzana (con tres orientaciones principales), o centrada entre medianeras interior (con dos orientaciones principales).

**Adosados** Dos hileras de parcelas por manzana, donde la parcela puede ser cabecera de la manzana (con dos orientaciones principales), o centrada entre medianeras (interior), con una orientación principal.



**Figura 7.4:** Tipologías de edificación residencial básica aplicadas.



**Figura 7.5:** Tipologías de edificación de bloques residenciales básica.

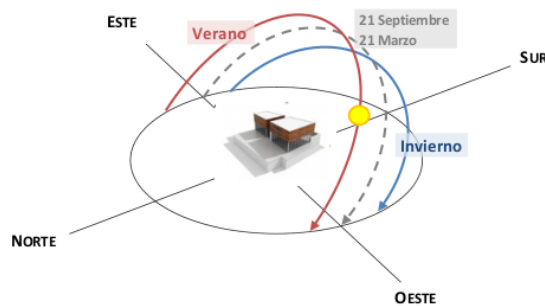
### Orientación

En el diseño del edificio, la orientación es un elemento que no puede ser optimizado, dado que es fijado por el arquitecto y el terreno a edificar. Sin embargo, su efecto es destacado en el estudio del edificio, ya que la orientación junto a la zona climática marcan el consumo del edificio. Pues de la orientación depende el aprovechamiento de la radiación solar de forma directa.

De forma general, los edificios maximizan la captación solar orientando las fachadas con mayor superficie de ventanas y las zonas de mayor uso hacia el sur. De

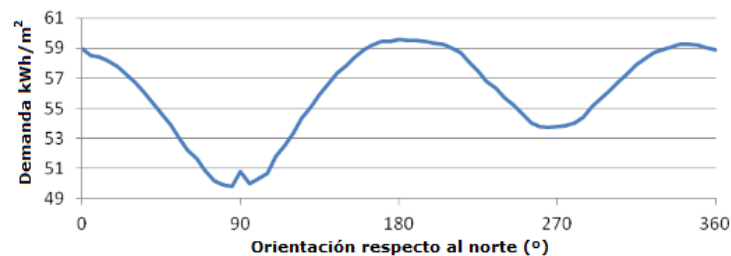
## 7.1 Análisis del problema: elementos de estudio

esta forma, en invierno, los rayos de sol calentarán de manera gratuita las estancias limitando el uso de sistemas de calefacción. Por contra, en verano se necesitan elementos que eviten que se sobre-calienten, con especial atención a los huecos. Como se observa en la figura 7.6, los rayos solares están muy inclinados respecto a la vertical durante el invierno, y por tanto en la orientación sur entra más luminosidad y calor. En verano, el sol se proyecta con una inclinación más vertical y recorrido es más largo, por lo que los huecos del edificio pueden ser protegidos mediante toldos, persianas, etc.



**Figura 7.6:** Orientación solar.

En la figura 7.7 [Druet et al., 2012] se representa el efecto de las sumas de las demandas de calefacción y refrigeración según la orientación para un bloque de viviendas situado en Granada. En éste, se puede observar como la orientación de una vivienda no sólo tiene efectos en la iluminación, sino también en el consumo energético de ésta.

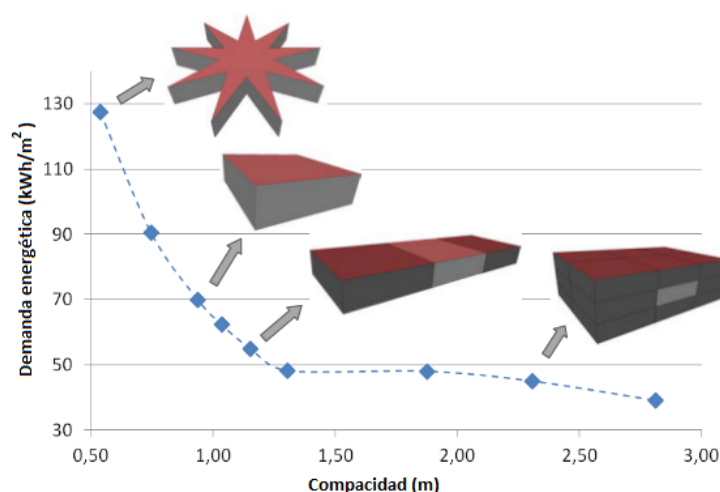


**Figura 7.7:** Ejemplo de efectos de la orientación en la demanda de un edificio [Druet et al., 2012].

## 7. EDIFICIOS DE ALTA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA

### Compacidad

La compacidad, es la relación entre el volumen encerrado por la envolvente térmica (volumen acondicionado),  $V$ , y la suma de las superficies de dicha envolvente (área de transferencia). Aunque en principio, lo lógico sería que un edificio más compacto tenga una demanda energética inferior, ya que una menor superficie con el exterior supone menor pérdida energética, sin embargo, también depende de la disposición del edificio, sus huecos, el tamaño, la forma y el contorno, por lo que comparar edificios que presentan compacidades diferentes no permite obtener resultados que se puedan comparar. Para entender el efecto e influencia de la compacidad en la demanda anual de climatización (calefacción y refrigeración), se puede ver el ejemplo presentado en [Druet et al., 2012], figura 7.8.



**Figura 7.8:** Demanda en función de la compacidad [Druet et al., 2012].

### Cerramientos opacos

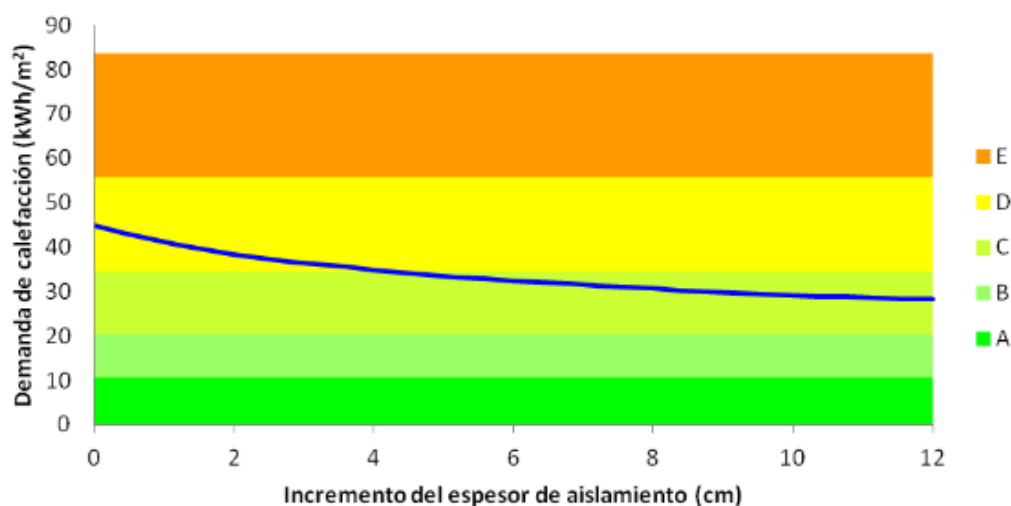
#### Aislamiento

En los cerramientos de las construcciones modernas, el elemento más importante es el aislante térmico, la mayoría de los materiales aislantes asociados a los cerramientos de un edificio reducen el coeficiente de transmisión de calor.

La transmitancia térmica, también denominado como valor-U en construcción, es el calor que fluye por unidad de tiempo y área, es decir, mide el calor transferido

## 7.1 Análisis del problema: elementos de estudio

a través de un sistema constructivo de caras plano paralelas. Se mide en  $W/m^2K$  o en  $W/m^2\text{ }^\circ C$ . El comportamiento de los cerramientos depende del valor-U, de manera que cuanto menor sea el valor-U, menor será el paso de energía, y por tanto mejor las capacidades aislantes del elemento constructivo. La transmitancia total de un cerramiento está más afectada por el material de menor conductividad, por lo que, en el caso del aislamiento, cuya conductividad suele ser de magnitud inferior a los demás materiales, un aumento del espesor produce que el aislante se convierta en la resistencia térmica dominante, lo que permite reducir las pérdidas de calor a través del cerramiento. La figura 7.9 presenta un ejemplo de la evolución de la demanda térmica de calefacción, para cada centímetro adicional de aislamiento de todos los cerramientos de la envolvente de un bloque de viviendas en Granada, la figura refleja el efecto de la variación en una letra para la calificación energética de la calefacción. El ejemplo tiene una tendencia asintótica en la reducción en la demanda térmica, por lo que cabe pensar que existirá un espesor concreto de aislamiento a partir del cual el ahorro energético no compense la inversión.

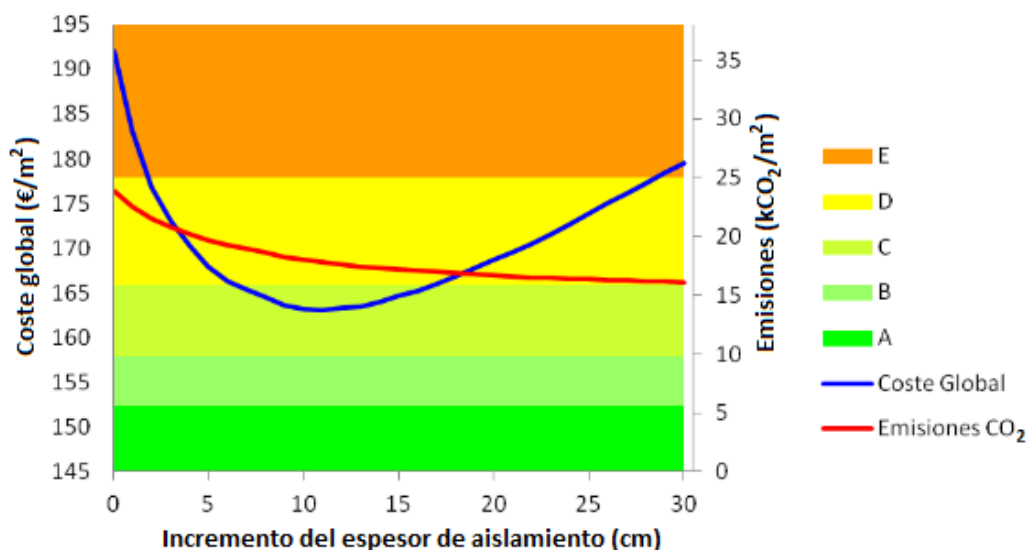


**Figura 7.9:** Demanda en función del espesor del aislamiento [Druet et al., 2012].

Un ejemplo similar, se puede observar en [Druet et al., 2012], para un estudio económico del coste global debido a los materiales, la climatización y el ACS para un periodo de 30 años. En la figura 7.10 se observa una curva azul, que representa el coste global, dicha curva mantendría la forma, pero puede ser desplazada hacia

## 7. EDIFICIOS DE ALTA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA

arriba o hacia abajo si se varían las condiciones de los precios del interés del dinero y del precio de la energía.



**Figura 7.10:** Ejemplo de coste global y emisiones de  $CO_2$  según el espesor de aislamiento.

La transmitancia térmica  $U$  ( $W/m^2K$ ) viene dada por la expresión 7.1.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (7.1)$$

Donde:

$R_T$  es la resistencia térmica total del componente constructivo [ $m^2K/W$ ].

La resistencia térmica total  $R_T$ , es la suma de las resistencias térmicas de cada capa o cámara de aire, junto a las resistencias térmicas superficiales correspondientes al aire interior y exterior. La resistencia térmica de cada capa se mide según la expresión 7.2.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (7.2)$$

Donde:

$e$  el espesor o espesor medio de la capa [m].

$\lambda$  la conductividad térmica de diseño del material que compone la capa [ $W/m K$ ].

### Color de la fachada

Aunque en los modelos de simulación y en el modelo simplificado analizado en el capítulo 8 no se ha tenido en cuenta, el color del cerramiento tiene influencia en los intercambios de calor que se realizan a través de los cerramientos opacos. Los colores oscuros absorben más radiación, y por tanto, aumentan la temperatura exterior del cerramiento, por esa razón, en el sur de España es predominante el uso de colores claros, que aumentará la reflexión de la luz incidente sobre el cerramiento y mantienen una temperatura más baja. Por tanto, los colores oscuros que aportan más absortividad (tabla 7.3), consiguen mejores ahorros en calefacción, por contra producen un aumento de la demanda de refrigeración. Igualmente, los colores claros que aportan una menor absortividad (tabla 7.3), aumentan la demanda de calefacción y disminuyen la demanda de refrigeración.

**Tabla 7.3:** Valores de absortividad correspondiente a cada color.

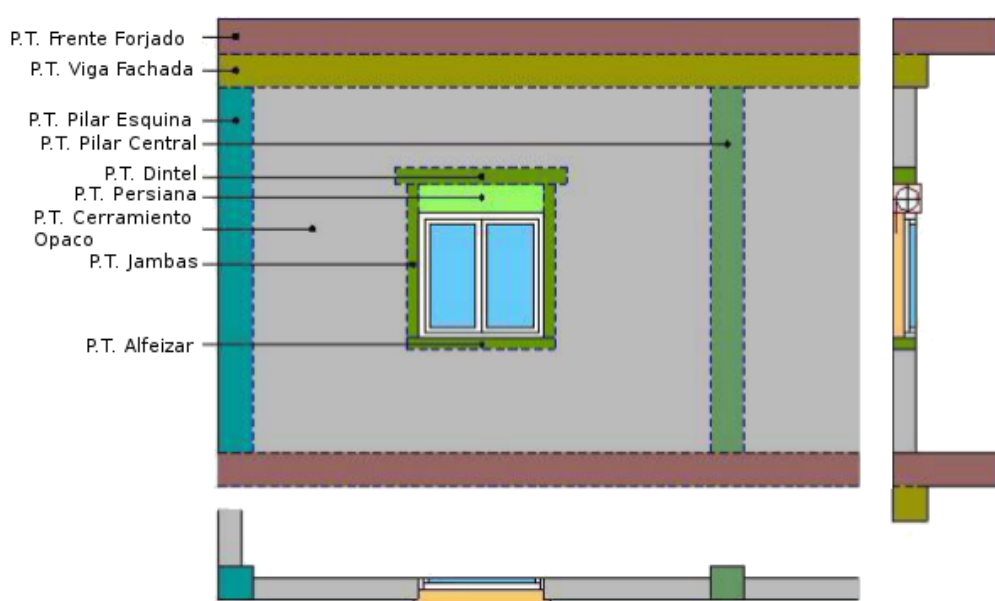
Color	Absortividad	Color	Absortividad
Blanca lacada	0.21	Marrón claro	0.80
Blanca brillante	0.25	Marrón medio	0.84
Plateada	0.25	Azul claro	0.88
Capa de aluminio	0.40	Marrón oscuro	0.88
Verde claro	0.47	Verde oscuro	0.89
Amarilla	0.57	Azul oscuro	0.91
Roja	0.74	Gris oscuro	0.91
Gris claro	0.75	Negra lacada	0.92
Media capa de óxido	0.78	Negra lisa	0.95
Esmalte marrón	0.79	Negra mate	0.98

### Puentes térmicos

Un puente térmico es cualquier zona puntual o lineal de la envolvente edificatoria donde se producen discontinuidades en la capa de aislamiento térmico, en la figura 7.11 se puede ver un ejemplo. Aunque una fachada de un edificio puede parecer continua y homogénea, en realidad existen uniones de elementos estructurales (pilares, forjados, etc.) o con huecos (puertas o ventanas), a estas interrupciones se

## 7. EDIFICIOS DE ALTA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA

les denomina puentes térmicos. Son zonas donde la resistencia térmica cambia, por penetración de un material con diferente conductividad, cambios de espesor o diferencias entre áreas del edificio (uniones, esquinas, etc.). Un puente térmico lineal se mide en  $W/m\ K$  y representa el flujo de calor que pasa a través de un metro lineal para una diferencia de temperatura de  $1K$  entre los dos ambientes situados a cada lado del puente térmico.



**Figura 7.11:** Ejemplos de zonas susceptibles de aparición de puentes térmicos [Mitchell et al., 2011].

### 7.1.3 Huecos y semitransparentes

Las ventanas, puertas y lucernarios son algunos de los elementos principales de las viviendas, se compone de una parte semitransparente, el vidrio, y una parte opaca, el marco. Y conforman los huecos de la envolvente de un edificio.

La transmitancia térmica de los huecos  $U_H$  ( $W/m^2\ K$ ) se determina mediante la expresión 7.3.

$$U_H = (1 - FM) \cdot U_{H,v} + FM \cdot U_{H,m} \quad (7.3)$$



## 7.1 Análisis del problema: elementos de estudio

Donde:

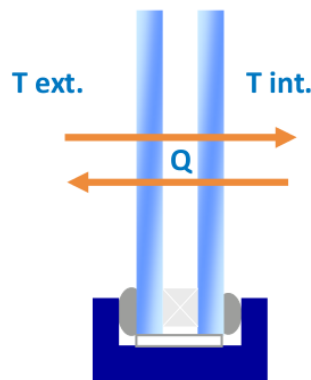
$U_{H,v}$  es la transmitancia térmica de la parte semitransparente [ $W/m^2 K$ ].

$U_{H,m}$  es la transmitancia térmica del marco de la ventana o lucernario, o puerta [ $W/m^2 K$ ].

$FM$  es la fracción del hueco ocupada por el marco.

El acristalamiento, es un sistema de cerramiento de huecos que, evita el paso del aire y permite el paso de la luz. Ayudando al ahorro energético en iluminación y mejorando el confort de los ocupantes. Además, los cristales aportan aislamiento térmico, control solar, protección contra la radiación UV y aislamiento acústico.

En el acristalamiento se deben tener en cuenta varios factores: transmitancia térmica, factor solar, transmisión luminosa y su aspecto. Siendo las dos primeras las que afectan a los modelos de cálculo de la calificación energética. La transmitancia térmica, por ser la capacidad de aislamiento cuando existe una diferencia de temperatura en ambos lados del acristalamiento (figura 7.12). Y el factor solar, por ser el sistema de protección frente al efecto invernadero producido por la radiación solar directa.

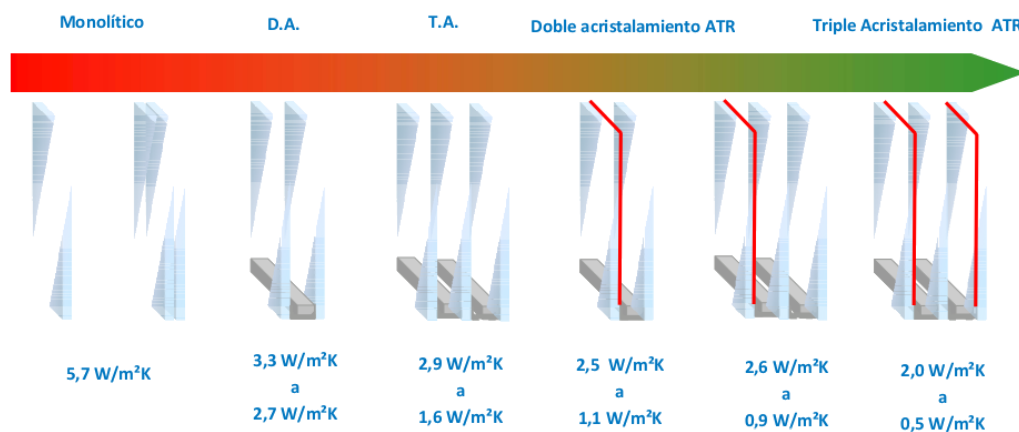


**Figura 7.12:** Transmitancia de un acristalamiento.

Los acristalamientos de un edificio se caracterizan por tener distinta transmitancia según su composición, como se muestra en la figura 7.13. El vidrio más simple es el denominado monolítico, a partir del cual se diseñan acristalamientos dobles

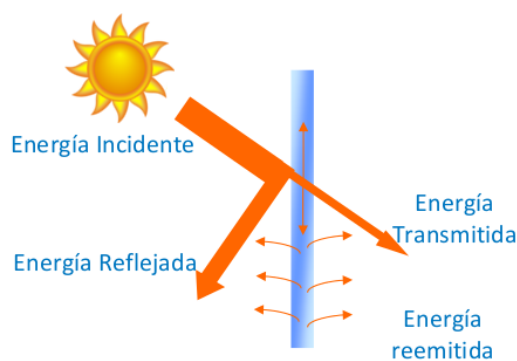
## 7. EDIFICIOS DE ALTA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA

(D.A.) y triples (T.A.), a los cuales se les pueden añadir aislamientos térmicos reforzados (ATR) que son vidrios con baja emisividad, y en algunos casos, control solar.



**Figura 7.13:** Tipologías de acristalamiento.

La segunda característica más importante es el factor solar (figura 7.14),  $g$ , es la fracción de energía de la radiación directa que penetra en la vivienda a través del acristalamiento. Es decir, es la medida de la cantidad de calor que atraviesa el acristalamiento cuando el sol incide sobre él.

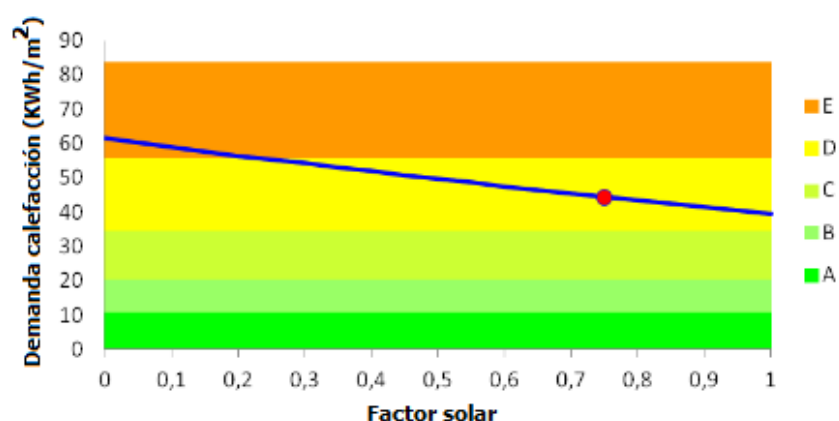


**Figura 7.14:** Efecto solar sobre un vidrio.

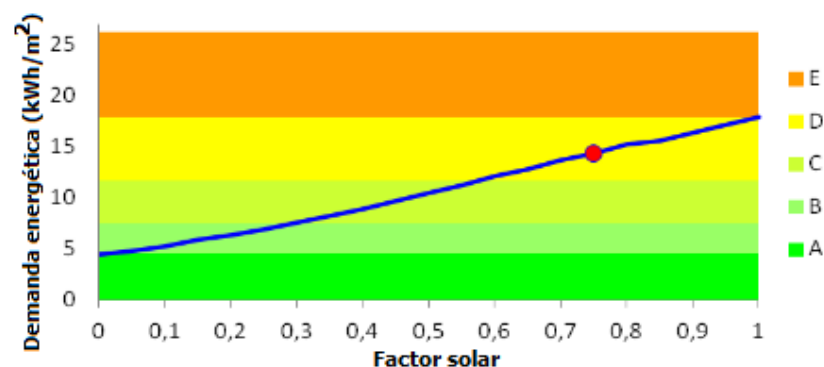
El valor  $g$  se compone de dos factores, la energía radiante del Sol que entra en el recinto por transmisión directa a través del acristalamiento y la energía que cede este acristalamiento en forma de energía térmica al interior del recinto tras

## 7.1 Análisis del problema: elementos de estudio

haber sido absorbida por el acristalamiento y haber producido su calentamiento. El valor de factor solar está comprendido entre 0 y 1. Cuanto mayor sea el factor solar mayor será la cantidad de radiación solar que entre. En las figuras 7.15 y 7.16 se presenta un ejemplo de demanda de calefacción y refrigeración respectivamente, en función del factor solar.



**Figura 7.15:** Ejemplo de demanda de calefacción según el factor solar [Druet et al., 2012].



**Figura 7.16:** Ejemplo de demanda de refrigeración según el factor solar [Druet et al., 2012].

El marco, es la parte opaca de la ventana, lucernario o puerta. Éste presenta como características térmicas, la transmitancia térmica, debida a la transferencia de calor entre su superficie interior y exterior, y la absorptividad, que se define según el color del marco, y representa la fracción de la radiación solar incidente en una

## 7. EDIFICIOS DE ALTA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA

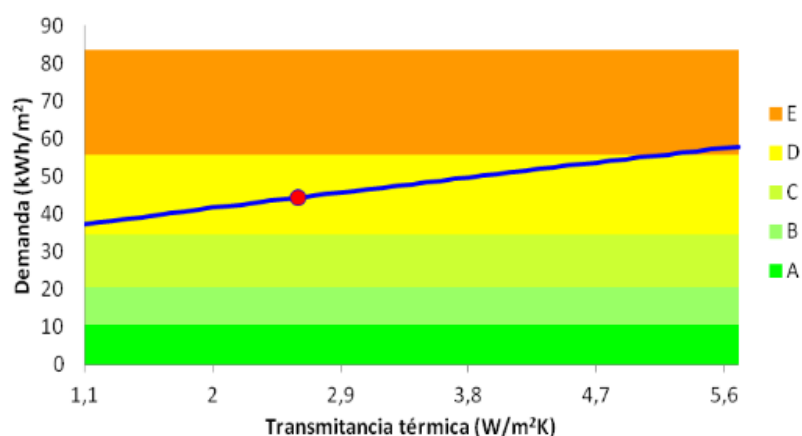
**Tabla 7.4:** Valores por defecto de los marcos, según UNE-EN ISO 10077-1:2010 [AENOR, 2010].

Marcos	$U (W/m^2 K)$
Metálico	5.7
Metálico RPT $4 < d < 12$	4.0
Metálico RPT $d > 2$	3.2
Madera dura	2.2
Madera blanda	2.0
PVC 2 cámaras	2.2
PVC 3 cámaras	1.8

Nota: RPT, Rotura de Puente Térmico

superficie. En la norma UNE-EN ISO 10077-1:2010 [AENOR, 2010] se presenta una explicación detallada tanto de los cálculos, como de los valores por defecto de los distintos elementos, incluidos los marcos, como se puede observar en la tabla 7.4.

De los valores de transmitancia de los huecos (figura 7.17), se observa que cuanto mayor sea la transmitancia térmica mayor será la demanda en calefacción.



**Figura 7.17:** Ejemplos de demanda de calefacción según la transmitancia de los huecos [Druet et al., 2012].

Para reducir la radiación solar en los huecos, también se pueden aplicar elementos de sombra, que ejercen de protección del edificio y afectan a la demanda del edificio durante todo el año, por lo que habría que estudiar sus dimensiones y

colocación, para que mejoren la climatización, en base a la inclinación solar, como se puede ver en la figura 7.6.

### 7.1.4 Sistemas de climatización

En principio se considera que todo edificio, sea cual sea su zona climática, necesita de sistemas de calefacción y refrigeración, salvo para la zona climática de verano 1, y podría también ocurrir en zonas climáticas suaves en las cuales la envolvente garantice que se mantienen condiciones razonables de confort, con letra A de calefacción y 2 de refrigeración.

El arquitecto o diseñador sólo puede influir sobre la envolvente del edificio, y es sobre ésta sobre la que debe prestar la máxima atención, dado que la instalación de los sistemas no es la que genera la demanda de un edificio, sino factores como el clima exterior, la epidermis del edificio o las características de ocupación y funcionales del edificio. La demanda de un edificio, junto con el rendimiento medio estacional de los sistemas son los elementos que influyen en el consumo y en la producción de  $CO_2$ . En el capítulo siguiente se expresan los cálculos correspondientes a los sistemas, pero para ello, se introducen previamente algunos conceptos.

El rendimiento es el cociente entre la potencia útil observada en un sistema y la potencia introducida al sistema.

$$\eta = \frac{\text{Potencia Útil}}{\text{Potencia Entrante}} \quad (7.4)$$

El rendimiento global de un equipo, es fruto del producto del rendimiento que proporciona cada uno de los elementos que conforman el proceso, es decir, del rendimiento instantáneo, del transporte, de la emisión o la regulación del sistema.

El rendimiento nominal de un sistema, se define como el cociente entre la demanda y el consumo de energía final de un equipo en unas condiciones de diseño estándar. El rendimiento nominal debe ser suministrado por el fabricante del equipo. Por otra parte, el rendimiento medio estacional es la relación entre la demanda y el consumo de energía final de un determinado equipo funcionando durante un periodo de tiempo en condiciones reales. Estos rendimientos se denominan COP medio estacional, cuando se trabaja con bombas de calor funcionando en modo

## **7. EDIFICIOS DE ALTA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA**

---

calefacción, y EER medio estacional, cuando están funcionando en modo refrigeración. Ambos se diferencian en que el rendimiento medio estacional tiene en cuenta el efecto sobre el rendimiento de los periodos en que los sistemas no trabajan a carga nominal, paradas y arranques mientras que el rendimiento nominal se mide en unas condiciones fijas de ensayo.

El rendimiento medio estacional de un sistema se puede obtener multiplicando el rendimiento nominal por un factor de ponderación calculado, éste es presentado en el capítulo 8.

Una vez conocido el rendimiento medio estacional se puede conocer el indicador de eficiencia energética de los sistemas, utilizado posteriormente en el procedimiento de certificación energética.

El rendimiento medio estacional, a partir del cual se define el consumo, se puede expresar como la relación anual de calor útil y la cantidad anual generada. La relación entre rendimiento medio estacional y el indicador de eficiencia energética es biunívoca y viene determinada por el tipo de combustible o fuente energética empleada por el sistema.

### **7.2 Construcciones de energía casi nula**

Los diseños de edificios de energía casi nula se han convertido en una prioridad para los arquitectos e investigadores multidisciplinares relacionados con la ingeniería y la arquitectura de la construcción [Kurnitski et al., 2011], para ellos las variables anteriormente mencionadas son la base para conseguir su objetivo. En la próxima década, todos los edificios nuevos tendrán alta calificación energética, los edificios de energía cero son edificios con un consumo de energía neta cero en un año típico. Esto implica que la demanda de energía para calefacción y energía eléctrica se reduce, y las necesidades de energía muy bajas se cubrirán de manera significativa por las fuentes de energía renovables.

El objetivo en esos edificios no es sólo reducir al mínimo el consumo de energía, sino también diseñar un edificio que equilibre las necesidades de energía con técnicas activas y tecnologías renovables. Estos edificios se pueden medir en términos de consumo de energía primaria y de emisiones de carbono, para así clasificarlos y etiquetarlos con una calificación energética.

El análisis de energía del ciclo de vida es un enfoque que tiene en cuenta todas las aportaciones de energía a un edificio en su ciclo de vida, e incluyen el uso de la energía en las siguientes fases: fabricación, uso y demolición [Ramesh et al., 2010]. Este estudio se centra en la fase de utilización y abarca todas las actividades relacionadas con el uso de los edificios, a lo largo de su vida útil. Esto incluye el uso de la electricidad y combustibles para calefacción, refrigeración y agua sanitaria.

La metodología de este estudio pretende desarrollar una estrategia con el objetivo de reducir la demanda de energía en los edificios. Con esta propuesta se pretende satisfacer la demanda. Si se utilizan fuentes de energía renovables, los edificios se consideran edificios de energía ‘cero’, a pesar de que existen diferentes definiciones. Según la UE, es “un edificio donde, como resultado del alto nivel de eficiencia energética de la construcción, el consumo anual de energía primaria total es igual o menor que la producción de energía a partir de fuentes de energía renovables” [Hernandez y Kenny, 2010]. Con la elección de los sistemas de aire acondicionado, como se presenta en el capítulo 9 se obtienen soluciones para edificios de energía casi nula.

### 7.3 Certificación energética de edificios

En la década de 1990 la UE introdujo el etiquetado energético con un doble objetivo. En primer lugar, informar a los consumidores sobre la eficiencia energética de los aparatos que consumen energía, y en segundo lugar, promover el ahorro energético y la eficiencia energética. El éxito en los aparatos domésticos (Directiva 1992/75), hizo que este se extendiera al etiquetado energético de edificios (Directiva 2002/91).

La certificación informa de las emisiones de  $CO_2$  producidas por el uso de sistemas de climatización. Ésta consta de 6 etiquetas posibles, figura 7.18, desde la letra A que califica al edificio como menos contaminante, hasta la letra G que representa a los más contaminantes. Cada etiqueta expresa la cantidad de emisiones anuales en  $kg$  de  $CO_2$  equivalentes por metro cuadrado de superficie útil de vivienda ( $\frac{kg\ CO_2}{m^2}$ ) y guardan relación con la cantidad de energía final (gas natural, gasóleo, energía eléctrica, y otros) que va a consumir la vivienda en calefacción, refrigeración y ACS en una zona climática determinada.

## 7. EDIFICIOS DE ALTA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA

**CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO TERMINADO** ETIQUETA

DATOS DEL EDIFICIO

Normativa Vigente Construcción/Rehabilitación	Tipo de Edificio
	Dirección
	Municipio
Referencia/s Catastral/es	C.P.
	C. Autónoma

**ESCALA DE LA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA**

	Consumo de energía kWh/m <sup>2</sup> año	Emissiones kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> año
<b>A</b> más eficiente		
<b>B</b>		
<b>C</b>		
<b>D</b>		
<b>E</b>		
<b>F</b>		
<b>G</b> menos eficiente		

REGISTRO

Valido hasta dd/mm/aaa

ESPAÑA

Directiva 2010/31/UE

**Figura 7.18:** Calificación energética de un edificio terminado.



### 7.3 Certificación energética de edificios

---

La certificación energética de un edificio depende de su demanda energética. En el capítulo 8 se presentan los cálculos correspondientes a la demanda e índice de eficiencia energética con el que se definen las diferentes letras de la calificación. Como se presentó en la sección anterior, del diseño de un edificio, se debe considerar: su forma, orientación, soluciones constructivas aplicadas, clima y demanda de calefacción, refrigeración y ACS. Sin embargo el cálculo puede ser simplificado, como se verá en adelante, tanto para el cálculo de la demanda, como para el uso de *Indicadores de Eficiencia Energética* (IEE).

La normativa de *Certificación de Eficiencia Energética* (CEE) de los edificios, R.D. 47/2007 establece dos procedimientos para realizar la calificación:

- Opción General (carácter prestacional), a través de un programa informático que desarrolla la metodología de cálculo recogida en el Real Decreto.
- Opción simplificada (carácter prescriptivo), donde el alcance y desarrollo de esta opción debe ser recogido en un documento reconocido que desarrolle la metodología de cálculo del anexo I del Real Decreto [BOE, 2007].

El modelo simplificado se desarrolla rellenando un conjunto de fichas o documentos que hacen referencia a datos de partida del edificio, al cálculo de los indicadores de demanda de calefacción, de refrigeración y de los sistemas de refrigeración, calefacción y ACS. Con todos estos datos, se calcula el indicador de eficiencia energética global, como se observa en la figura 7.19.

Para el estudio de la certificación energética se establecen indicadores energéticos principales y varios complementarios. El primer indicador energético principal, es el dado por las emisiones anuales de  $CO_2$ , expresadas en  $kg$  por  $m^2$  de superficie útil del edificio. El segundo indicador principal, considera la energía primaria anual, en  $kWh$  por  $m^2$  de superficie útil del edificio. Ambos se obtienen de la energía consumida por el edificio para satisfacer las necesidades asociadas a unas condiciones normales, tanto climáticas como de funcionamiento y ocupación. En cualquier caso, el edificio se comparará con otros (de referencia) que se encuentren en el mismo clima, estando éste definido en términos del conjunto de variables y zonificaciones climáticas que se definen en las diferentes secciones del documento básico HE de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación (CTE-HE).

## 7. EDIFICIOS DE ALTA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA



**Figura 7.19:** Flujo de cálculos del procedimiento simplificado.

### 7.3.1 Oportunidades de la CE

En el sector de la edificación, la reglamentación existente para la certificación energética es responsable de fuertes porcentajes del consumo energético, por lo que el impacto del uso y aplicación de la normativa es representativo. Para los expertos, tras el pequeño periodo de tiempo transcurrido desde su implantación, ya se comienza a percibir una repercusión de la misma en el sector, especialmente en el campo de los materiales y elementos constructivos. Igualmente, en lo que respecta a los sistemas de climatización, éste se ha desplazado hacia mejores rendimientos y menores emisiones.

Los usuarios de las edificaciones construidas, son tenidos en cuenta a través del etiquetado energético de la edificación, debido a que se estudia el proceso de gestión del edificio como sistema energético a lo largo de la vida útil del mismo. Aunque se realizan críticas y existen problemas, las “regla para medir” energéticamente los edificios han resultado positivas, y por tanto una herramienta para comparar edificaciones.

La calificación de los edificios, es una oportunidad para la innovación y la mejora del diseño arquitectónico, aunque las herramientas existentes no facilitan la

### 7.3 Certificación energética de edificios

---

calificación energética de aquellas técnicas constructivas que pueden ser consideradas innovadoras o singulares, especialmente en el ámbito de la limitación de la demanda. Sin embargo, para el sector de la construcción, la certificación energética puede hacer que se considere el medio ambiente como un factor significativo a la hora de plantear negocios asociados a la construcción.

La certificación energética de edificios supone un primer paso en el conocimiento de la eficiencia energética de los edificios construidos. Los certificados de eficiencia energética aportan datos del comportamiento energético de los edificios, a nivel de proyecto, que posteriormente deberá ser contrastado con su puesta en obra, y con el uso posterior del edificio.

Los datos energéticos que aportan los certificados de eficiencia energética, no tendrán ningún valor si no representan la realidad del edificio que finalmente se construye, por eso se debe dar especial importancia al control en obra. Si el edificio que se construye varía sustancialmente en sus aspectos energéticos del edificio proyectado, los datos aportados por el “certificado del proyecto” servirán de poco. Para esto está el “certificado de edificio terminado”, que debe recoger con especial rigor los cambios que ha sufrido la construcción respecto a lo especificado en proyecto.

La certificación energética de edificios también está obligando a los profesionales del sector a actualizar sus conocimientos, de manera que los proyectos y construcciones están generando nuevos planteamientos y nuevas soluciones que mejoran el comportamiento energético de los edificios.

La existencia de la calificación va a permitir a los usuarios o clientes comparar el comportamiento energético de un bien que, por lo general, se adquiere para largos periodos de tiempo.

En principio, y como consecuencia de lo anterior, parece que la tendencia del mercado sea la de construir edificios cada vez más eficientes, que es uno de los objetivos de la directiva. En definitiva, puede ser una oportunidad para la innovación en la edificación y para la mejora del diseño arquitectónico.

### 7.4 Limitaciones de los procedimientos de certificación energética

El proceso de certificación se centra en la reducción de emisiones de  $CO_2$ , junto con la adecuación de las condiciones interiores a condiciones de confort para el ser humano.

El procedimiento considera parcialmente las emisiones de  $CO_2$  generadas por el proceso edificatorio, por contra, el sistema deja a un lado aspectos importantes del análisis del ciclo de vida de la edificación, tales como la producción de los elementos y sistemas que existen en los espacios a acondicionar. El desarrollo de nuevas tecnologías que potencien la limitación de la demanda energética a lo largo de la vida útil de la edificación puede conllevar un aumento de emisiones de  $CO_2$  en el proceso global.

Una de las limitaciones actuales es la obligatoriedad de uso de una sola herramienta, lo cual restringe las posibilidades de aplicación. Además, existe un bajo nivel informativo en la propia herramienta que se propone para dar cobertura a la normativa. Si bien es posible la localización de muchos de los valores y supuestos técnicos empleados en los correspondientes documentos reconocidos, estos van dirigidos más a especialistas en energía que a los usuarios de la herramienta.

El procedimiento tiene limitaciones debidas a la aplicación de algunos recursos y soluciones arquitectónicas, como la ventilación cruzada, sistemas de captación pasiva, etc. Además, las simplificaciones que han de realizarse para la introducción de sistemas pasivos en las herramientas proporcionadas pueden resultar problemáticas en función de la interpretación que de las mismas sea realizada por las correspondientes entidades de control.

Otro aspecto a considerar es la falta de información acerca de herramientas y protocolos de control definidos por parte de las administraciones regionales y locales. Estas suponen una incertidumbre que puede transformarse en problemática para los responsables de la CE del edificio, ya que se les exigirán comprobaciones y justificaciones que al momento de la firma no están claramente definidas. Para otros, existe un peso excesivo de los sistemas de instalaciones en la valoración final. Para los técnicos, existen carencias de la herramienta desde el punto de vista

#### 7.4 Limitaciones de los procedimientos de certificación energética

---

funcional, lo que dificulta su uso por parte de los técnicos que redactan el certificado. Sería necesario mejorar su accesibilidad informática porque eso también garantiza una mayor fiabilidad en los resultados.

Por último, existen limitaciones que intentan ser mejoradas mediante la metodología presentada en esta tesis. Las limitaciones actuales debidas a la opción simplificada, que actualmente sólo se puede aplicar a través del único documento reconocido, que, aun siendo de fácil aplicación, no permite obtener una calificación mejor que la *D*. A la espera de que se aprueben otros procedimientos simplificados reconocidos que permitan obtener mejores calificaciones, parece que este procedimiento no es una buena opción si lo que se quiere es potenciar edificios energéticamente eficientes. Para ello, la solución es el uso de la calificación a través de la opción general, para la cual se usa el programa informático oficial o de referencia, CALENER, en sus versiones VYP (vivienda y pequeño-mediano terciario) y GT (gran terciario).

La utilización de dichos programas requiere, por un lado, del conocimiento del manejo de dichas herramientas, y por otro, del conocimiento previo de conceptos relacionados con la energética edificatoria, tanto en lo que se refiere a la envolvente como en lo que se refiere a los sistemas. Sin embargo, esto último es solucionado mediante un sistema experto que es capaz de seleccionar por el usuario los elementos necesarios de la envolvente, y los sistemas óptimos.

Aun así, existen limitaciones que deben de ser superadas en el futuro, y que hacen referencia al ámbito de aplicación. Por esta razón, se plantea la necesidad de trabajar en nuevas herramientas de calificación, ya sea por la vía simplificada o general. Puesto que el procedimiento actual no contempla suficientemente algunos aspectos como los sistemas solares pasivos o la ventilación natural. En este sentido, el procedimiento actual penaliza a los edificios residenciales que no utilizan instalaciones activas de climatización, otorgándoles bajas calificaciones. Además LIDER y CALENER, siempre comparan con edificios de referencia que sí contemplan instalaciones activas.

Existen otras áreas de trabajo que están siendo mejoradas con las últimas investigaciones, uno de estos casos es la zonificación climática, establecida desde el Código Técnico de la Edificación. En ciertas situaciones, ésta no se corresponde con la zonificación climática real del territorio español, aspecto éste que impide

## 7. EDIFICIOS DE ALTA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA

---

obtener demandas energéticas reales, lo que a su vez imposibilita reducir las emisiones de  $CO_2$  a la atmósfera porque los sistemas activos requeridos por el procedimiento actual no se corresponden con los requerimientos reales de las viviendas para estar en confort térmico. Así, los sistemas activos instalados, al no aportar un confort adecuado, no sólo no ayudarán a reducir las emisiones de  $CO_2$ , sino que éstas aumentarán.

### 7.5 Proceso de mejora continua

La sociedad aplica con los años un ciclo de mejora continua, para mejorar la eficiencia energética, se trata de un proceso similar a los ciclos de mejora basados en “Plan-Do-Check-Act” (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar). Los ciclos de mejora se basan en una premisa inicial, tomar una decisión sobre aquello que se quiere implantar. En este caso, como se verá en el apartado de normativas (7.6), la certificación y la auditoria energética es un primer paso, ambas ayudan a recopilar información sobre las oportunidades de ahorro y sacar el máximo provecho a las medidas que ya están disponibles.

Esta información, permite una toma de decisiones bien fundamentada, para decidir los siguientes pasos. En general, las primeras acciones identificadas son medidas pasivas para establecer las bases de la edificación. El siguiente paso tras las medidas pasivas es la mejora y decisión en los sistemas activos, la optimización de los sistemas. Para estar seguros de que las medidas puestas en marcha resultan efectivas y sostenibles, puede ser necesario realizar mediciones y controles adicionales a lo largo de la vida del edificio. Una vez es conocida la demanda de los edificios, se dispone de datos energéticos más detallados, a partir de los cuales es probable que se pueda ahorrar más energía, y por tanto comenzar de nuevo el ciclo. Pues con el tiempo, las normativas exigirán menor consumo energético, éste afectará a los edificios y al modelo de negocio, donde la construcción se basará en la mejora de características edificatorias, pues como históricamente ha sucedido, en función del cambio climático y del coste de la energía la sociedad aplicará nuevas normativas que ayude, a mejorar la eficiencia de nuestra sociedad.

### 7.6 Normativas

Existen diversas normativas europeas y directivas de eficiencia energética de los edificios. En este apartado se presentan aquellas que tienen mayor interés en el ámbito de esta investigación.

El documento principal, denominado documento paraguas, es el CEN/TR 15615 [AENOR, 2012a], éste presenta una explicación de las principales relaciones entre varias normas europeas y la directiva de eficiencia energética de los edificios (EPBD). Se trata de un documento que intenta explicar las principales relaciones entre las diferentes normas y su utilización.

La norma UNE-EN 15217 [AENOR, 2012b] es una norma enfocada en la eficiencia energética de los edificios. Ésta presenta un método para expresar la eficiencia energética y para la certificación energética de los edificios. La norma, presenta los indicadores generales para expresar la eficiencia energética de todos los edificios, incluyendo la calefacción, ventilación, aire acondicionado, ACS y sistemas de iluminación. Esto incluye los posibles indicadores así como un método para normalizarlos. El documento muestra los modos que existen para expresar los requisitos energéticos para el diseño de nuevos edificios o la renovación de los ya existentes. En él también se presentan los procedimientos para definir valores y puntos de referencia, y los modos para designar los programas de certificación energética.

La UNE-EN 15603 [AENOR, 2008b] es una norma española (UNE) de eficiencia energética de los edificios, que aborda el consumo global de energía y la definición de las evaluaciones energéticas. Esta norma tiene como objeto cotejar los resultados de otras normas que calculen los consumos energéticos para servicios específicos en el interior de los edificios o controlar la energía generada en ellos. Además, la norma explica la presentación de un resumen del consumo energético global del edificio en forma de tablas. La norma también proporciona los coeficientes energéticos basados en energías primarias, emisiones de  $CO_2$  u otros parámetros definidos en políticas energéticas nacionales, junto a estos se establecen unos principios generales para el cálculo de factores de energía primaria y coeficientes de emisión de carbono y se definen los servicios energéticos a tener en cuenta para el establecimiento de las evaluaciones de eficiencia energética para edificios diseñados y existentes.

## **7. EDIFICIOS DE ALTA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA**

---

La norma UNE-EN 15316-1 [AENOR, 2008a] define de forma general los método para el cálculo de los requisitos de energía y eficiencia en sistemas de calefacción en los edificios. La norma establece la estructura para el cálculo del uso de la energía en los sistemas de calefacción y en los sistemas de ACS de los edificios. Normaliza los consumos y las potencias útiles requeridos para el cálculo, con el fin de conseguir un método de cálculo común europeo. El método de cálculo facilita el análisis energético de los diferentes subsistemas del sistema de calefacción incluido el control (emisión, distribución, almacenamiento y generación) a través de la determinación de las pérdidas energéticas del sistema y de los factores de eficiencia del sistema. Este análisis de eficiencia permite la comparación entre los subsistemas y hacen posible controlar el impacto de cada subsistema en la eficiencia energética del edificio. Los cálculos de las pérdidas energéticas de cada subsistema del sistema de calefacción se definen en las normas sucesivas, EN 15316, partes 2, 3 y 4.

Otras normativas hacen referencia a la ventilación de edificios, y los métodos de cálculo para la determinación de las tasas de los caudales de aire en edificios, incluyendo la infiltración (UNE-EN 15242), las pérdidas de energía debidas a la ventilación y la infiltración (UNE-EN 15241), la ventilación en edificios no residenciales (EN 13779), o la norma EN 15243, sobre la ventilación de los edificios y el cálculo de la temperatura de recintos, de las cargas y de la energía para los edificios con sistemas de acondicionamiento. La norma presenta un método que es una alternativa a los métodos de cálculo simplificados tales como los utilizados para calcular la carga calorífica de acuerdo con la Norma EN 12831 y energía calorífica de acuerdo con el proyecto de Norma prEN ISO 13790. Esta norma no describe ningún método detallado para el cálculo de la carga sensible de los recintos. Para esto, se refiere a las Normas aplicables EN ISO 13791, EN ISO 13792, EN 15255 y EN 15265. Esta norma especifica métodos simplificados y describe la necesaria funcionalidad de los métodos de cálculo del consumo de energía anual normalizado mediante sistemas que aseguran una regulación de temperatura, una ventilación mecánica y un control de la humedad en los edificios nuevos y existentes. Estos sistemas denominados como HVAC pueden suministrar todo o parte de estos servicios incluidos la calefacción, la refrigeración, la filtración de aire, la humidificación o la deshumidificación.



El cálculo de la demanda de energía para calefacción y refrigeración en el interior de los edificios, se trata en la ISO 13790 [AENOR, 2011]. Esta norma proporciona métodos de cálculo para la evaluación del uso energético anual para refrigeración y calefacción de espacios de edificios residenciales, no residenciales o parte de ellos. Incluye el cálculo de transferencia de calor por transmisión y ventilación del edificio cuando se calienta o se refrigera a temperatura interna constante; la aportación de fuentes de calor internas y calor solar al equilibrio de calor del edificio; las necesidades anuales de energía para calefacción y refrigeración; la energía anual requerida por los sistemas de calefacción y refrigeración del edificio para la calefacción y refrigeración de espacios; la energía adicional anual necesaria por un sistema de ventilación, etc. Los edificios pueden tener varias zonas con diferentes temperaturas de consigna y pueden tener refrigeración y calefacción intermitentes. El período de cálculo es de un mes o una hora o (para edificios residenciales) la estación de calefacción o refrigeración.

Existen otras normas que hacen referencia a los cálculos, la norma EN 15255 sobre el cálculo de la carga de refrigeración sensible de un recinto y los criterios generales y procedimientos de validación. La norma EN 15265 para el cálculo de las necesidades energéticas para calefacción y refrigeración de locales empleando métodos dinámicos, la cual presenta los criterios generales y procedimientos de validación. La norma ISO 13791 sobre el comportamiento térmico de edificios, que presenta el cálculo de temperaturas interiores de un local sin refrigeración mecánica en verano. Esta norma presenta los criterios generales y métodos de validación, y la norma UNE-EN ISO 13792 presenta los métodos simplificados.

## 7.7 Conclusiones

El presente capítulo ha permitido conocer y acercar los elementos de estudio de los edificios. Dichos elementos tienen efectos en la demanda y en la eficiencia energética de lo mismo, como se ha observado en los ejemplos presentados. Algunos de estos elementos son parámetros fijos en el diseño del edificio, que se refieren a la orientación o el clima. Sin embargo, sobre otros se deben ejercer decisiones.

La selección de los cerramientos y los huecos, junto con los sistemas de climatización marcan la demanda de un edificio y por tanto su calificación energética.

## **7. EDIFICIOS DE ALTA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA**

---

Los edificios actuales deben seguir un conjunto de directivas y normativas que limitan o ayudan a la decisión que deben tomar los arquitectos y que puede ser mejorada en base a la metodología que se presenta en el siguiente capítulo.

En las definiciones de las variables, se puede observar que existen curvas de tendencia en la variación de éstas e incluso en el coste. Esto lleva a pensar que la búsqueda de la solución óptima puede ser encontrada dentro de la frontera de Pareto de cada variable, y por tanto la solución óptima se encontrará en el Pareto del conjunto de variables.

*KISS: Keep it simple, Stupid!*

Kelly Johnson

CAPITULO

# 8

## Metodología

Mediante LIDER y CALENER, la simulación permite la evaluación y estudio de los objetivos y aspectos de diseño previos a la construcción, con los que los usuarios pueden desarrollar modelos de referencia para su diseño final. La metodología propuesta, asiste en el estudio e identificación de soluciones y alternativas. Permite realizar un análisis de sensibilidad para visualizar de forma inmediata las ventajas y desventajas económicas de una modificación del proyecto, y mediante la evaluación y ponderación de las alternativas respecto de los objetivos o criterios de búsqueda, se presenta la selección de elementos constructivos que mejoran el diseño inicial del usuario.

### 8.1 Esquema metodológico

El conjunto de actividades que forman parte del proceso propuesto se presenta en la figura 8.1, y atiende a la siguiente estructura organizativa.

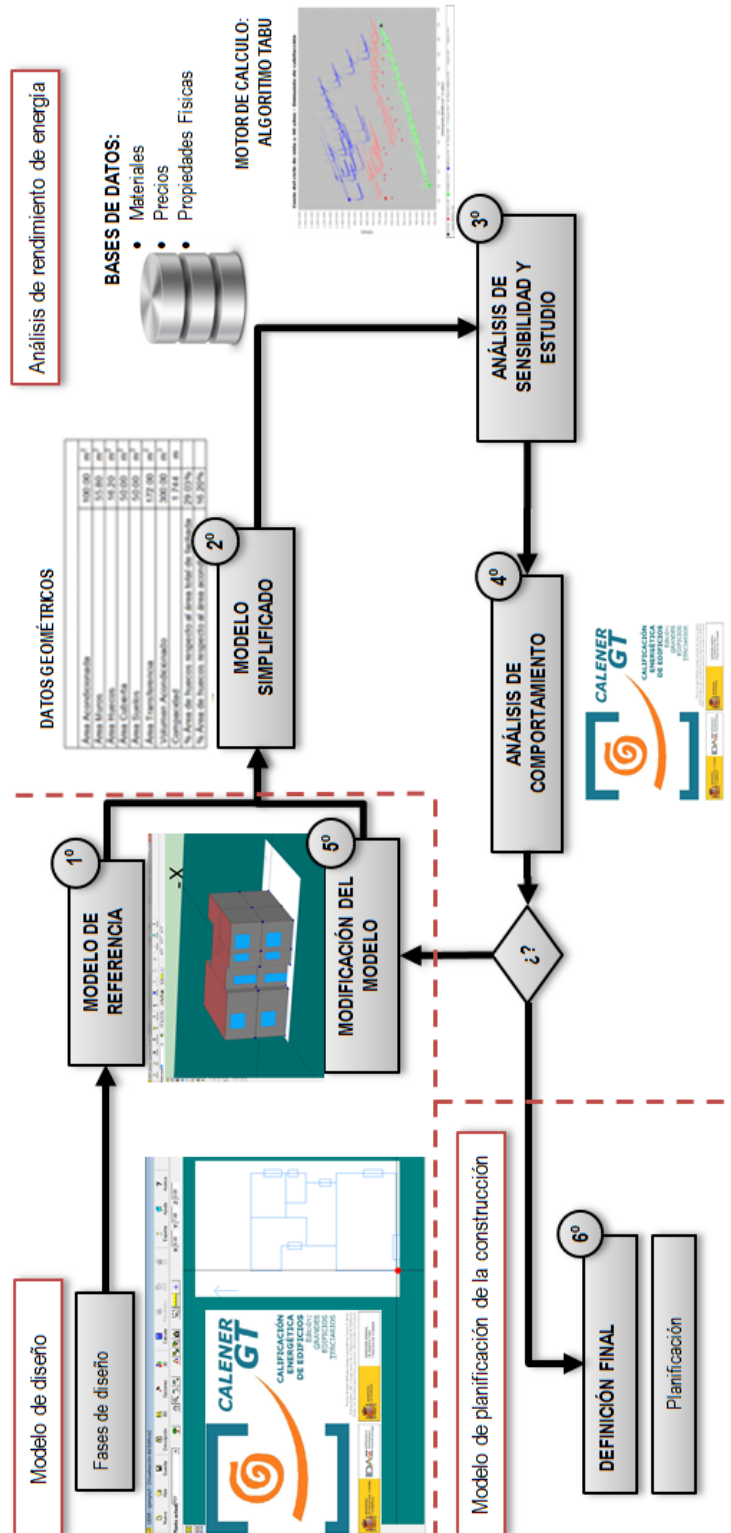
1. Modelo de referencia: El arquitecto o ingeniero (usuario), en la fase de diseño realiza un modelo inicial mediante el uso de la aplicación LIDER-CALENER. Este modelo define las características constructivas del edificio junto a un conjunto variables independientes relacionadas con la ubicación

## 8. METODOLOGÍA

---

del edificio y su correspondiente zona climática. Tras la ejecución del programa, el modelo inicial es aceptado en el Código Técnico de Edificación (CTE).

2. Modelo simplificado: Se calcula la demanda y el CCV estimado para el modelo inicial del edificio. El usuario selecciona los elementos de la epidermis que pueden variar en el análisis y la información de la base de datos de materiales y precios con la que quiere trabajar.
3. Análisis de sensibilidad y estudio: Se realiza un estudio de los posibles valores y se comprueban las variaciones o cambios leves en el modelo. Se aplica una optimización basada en la búsqueda tabú, ésta explora el espacio de soluciones tratando de evitar los óptimos locales, para encontrar la solución óptima global del edificio para los elementos y materiales con los que el usuario quiere encontrar una solución constructiva.
4. Análisis de comportamiento: Se estudia el comportamiento oficial (LIDERCALENER) del edificio seleccionado en base al método de certificación que verifica los valores del modelo simplificado.
5. Modificación del modelo: Si el resultado del modelo simplificado no coincide con el programa oficial, se vuelven a ajustar los coeficientes del modelo simplificado (vuelta al paso 2).
6. Definición final: Si el modelo es correcto, finaliza el estudio energético del edificio.



**Figura 8.1:** Metodología del proceso de optimización.

## 8. METODOLOGÍA

---

### 8.2 Elementos de definición

La definición de una vivienda, viene detallada por un conjunto de parámetros, variables y datos dependientes de las variables. En la fase inicial del desarrollo, toman prioridad las necesidades del cliente y el diseño, en este punto, no se conoce qué características tomará finalmente el proyecto, las soluciones constructivas adoptadas o los sistemas de climatización que demande el edificio. En el procedimiento de diseño, y para el uso de esta metodología, se usan los parámetros de edificio de la tabla 8.1, donde algunos parámetros están asociados a varios elementos constructivos. Los elementos constructivos son: cubierta, suelo, muros y ventanas. Muros y ventanas son estudiados en diferentes orientaciones dependiendo de la estructura del edificio.

**Tabla 8.1:** Parámetros del edificio.

Parámetro	Descripción
$plantas$	El número de plantas del edificio.
$A_i$	El área de transferencia de un elemento constructivo $i$ .
$altura$	La altura libre de los espacios (m.).
$ASSE$	El área solar sur equivalente. Es la relación entre la radiación que reciben las ventanas en sus correspondientes orientaciones teniendo en cuenta las sombras propias y/o lejanas, junto con la radiación que recibirían si estuvieran orientadas al sur sin ningún tipo de sombra (adimensional).
$g$	El factor solar medio de las ventanas (adimensional).
ventilación	Las renovaciones hora de ventilación y/o infiltración.
$L_i$	La longitud del puente térmico $i$ .
$Aa$	El área acondicionada

En la tabla 8.2, se presentan las variables del edificio, es decir, las incógnitas que se obtienen con el modelo. En el estudio, se pueden limitar los porcentajes de área de ventana aplicables en la optimización, dado que existen orientaciones que favorecen áreas mayores o menores de ventana.

En la optimización de la solución, las variables generan soluciones vecinas del problema en la aplicación de la metaheurística aplicada (búsqueda tabú). El resto

## 8.2 Elementos de definición

**Tabla 8.2:** Variables del edificio.

Variables	Descripción
$av_i$	El porcentaje de área de ventana en la orientación i.
$p_i$	La permeabilidad de la ventana en la orientación i.
$U_i$	La transmitancia térmica de un elemento i.
$\Psi_i$	La transmitancia térmica lineal del puente térmico i.

de valores se mantienen fijos en cada iteración algorítmica, excepto los valores dependientes de las variables, tabla 8.3.

**Tabla 8.3:** Valores dependientes de las variables del edificio.

Valor	Descripción
$A_t$	El área de transferencia.
$U_m$	La transmitancia térmica media del edificio, calculada a partir de las transmitancias de los elementos de la envolvente, incluidos los puentes térmicos. La transmitancia térmica media se mide en $W/m^2 \text{ } ^\circ K$ . $U_m = \frac{\sum_{\forall \text{ muros exteriores}} A_i U_i + \sum_{\forall \text{ ventanas}} A_i U_i + \sum_{\forall \text{ cubiertas}} A_i U_i + \sum_{\forall \text{ suelos}} A_i U_i}{A_t}$
$U_m$ <i>sin cubierta</i>	La transmitancia térmica media del edificio, calculada a partir de las transmitancias de los elementos de la envolvente, sin incluir la cubierta e incluidos los puentes térmicos. La transmitancia térmica media se mide en $W/m^2 \text{ } ^\circ K$ . $U_{m \text{ sin cubierta}} = \frac{\sum_{\forall \text{ muros exteriores}} A_i U_i + \sum_{\forall \text{ ventanas}} A_i U_i + \sum_{\forall \text{ suelos}} A_i U_i}{A_t}$
$\frac{V}{A_t}$	La compacidad, es la relación entre el volumen encerrado por la envolvente térmica (volumen acondicionado), V, y la suma de las superficies de dicha envolvente (área de transferencia), $A_t$ . La compacidad se mide en m. El área de transferencia, se calcula: $A_t = \sum_{\forall \text{ muros exteriores}} A_i + \sum_{\forall \text{ ventanas}} A_i + \sum_{\forall \text{ cubiertas}} A_i + \sum_{\forall \text{ suelos}} A_i$
$\frac{A_v}{A_a}$	El área de ventanas equivalente al sur dividido por el área acondicionada.

En la tabla 8.4, se presentan los parámetros climáticos del lugar donde se construya el edificio. Finalmente, en la tabla 8.5 se presentan las propiedades térmicas del aire.

## 8. METODOLOGÍA

**Tabla 8.4:** Parámetros climáticos del lugar geográfico.

Parámetro	Descripción
<i>Localidad</i>	La localidad geográfica.
<i>GD</i>	Los grados-día de invierno de la localidad para el periodo considerado.
<i>Is</i>	La radiación global acumulada sobre superficie vertical con orientación sur en el periodo considerado en $kWh/m^2$ .

**Tabla 8.5:** Propiedades térmicas del aire.

Propiedad	Descripción
$\rho$	La densidad del aire. Se toma igual a $1,2 \frac{kg}{m^3}$ .
$C_p$	El calor específico del aire a presión constante. Se toma igual a $1 \frac{kJ}{kg K}$ .

### 8.3 Reglas de Conocimiento: Cálculo de demandas de calefacción y refrigeración

El software del CTE para el estudio de los edificios, LIDER, realiza un estudio de las cargas térmicas, es decir, las variaciones de las condiciones térmicas del edificio. En base a la carga térmica se determinan los sistemas a incorporar al edificio y el consumo energético, es decir, la demanda energética. En base a ésta se consideran los sistemas de refrigeración y calefacción con los cuales se modifican la cantidad de calor del edificio para permitir alcanzar condiciones confortables. La cantidad de calor que se extrae o aporta al edificio, es denominada carga térmica de calefacción o refrigeración, y se estudia generalmente para un periodo anual, dado que las condiciones de demanda de un edificio varían a lo largo del tiempo.

La metodología definida requiere de un modelo simplificado, que evite realizar simulaciones del año completo en base a métodos de base horaria (estudios del año, hora a hora). El método simplificado parte de una muestra de edificios seleccionados y para un conjunto formado por varias tipologías, se generó una base de datos de demandas energéticas utilizando el programa LIDER.

En total, la base de datos con los resultados de demandas energéticas de calefacción y refrigeración estaba formada por: 6 tipologías · 50 localidades · 18 variantes de geometría-construcción = 5400 combinaciones. Esta base de datos ha



permitido relacionar cada valor de demanda con las características geométricas y constructivas del edificio y el clima para el que ha sido simulado, en lo que se puede denominar una base de datos de conocimiento.

Así, mediante el uso de las correlaciones, se podrá realizar una estimación de las demandas de calefacción y refrigeración, conocidos los datos referentes a la tipología del edificio, la localidad donde se encuentra y las características geométricas y constructivas del edificio. Adicionalmente se podrán comparar, en términos energéticos o de emisiones de  $CO_2$  equivalentes, distintos escenarios de interés.

## 8.4 Modelos de demanda

Hasta ahora, se han desarrollado varias metodologías a partir de las cuales se puede estimar el consumo o la demanda de energía. Algunos de estos métodos se basan en estimaciones [Fumo et al., 2010] y [Smith et al., 2011]. La metodología presentada, utiliza un modelo simplificado para estimar la demanda anual de un edificio, el modelo incluye la demanda de calefacción y refrigeración siguiendo el modelo desarrollado por Álvarez et al. [Álvarez et al., 2012] [Guadix et al., 2012].

El estudio de la *Demanda de Calefacción* (DC) considera como meses de calefacción: enero, febrero, marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre. El resto, son considerados para los meses de refrigeración. Para el cálculo de la demanda de calefacción ( $kWh/m^2$ ) se propone la ecuación 8.1.

$$\begin{aligned}
 DC = & a \cdot (Um/(V/A_t)) \cdot (altura) \cdot GD \cdot (24/1000) \\
 & + b \cdot (Av/Aa) \cdot g \cdot ASSE \cdot Is \\
 & + c \cdot (\text{ventilación}) \cdot \rho \cdot Cp \cdot (altura) \cdot GD \cdot (24/3600) \\
 & + d
 \end{aligned} \tag{8.1}$$

Donde : a, b, c, d son los coeficientes de la ecuación.

El significado de cada término de la DC es el siguiente:

- El primer término recoge la influencia del nivel de aislamiento del edificio, de su compacidad y del clima, a través de los grados-día. Tiene signo positivo porque contribuye a aumentar la DC.

## 8. METODOLOGÍA

---

**Tabla 8.6:** Coeficientes de la correlación de demanda de calefacción para la zona climática B4 y diferentes tipologías de edificios.

B4	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6	Tipo 7	Tipo 8
a	0,322	0,385	0,398	0,443	0,413	0,453	0,448	0,434
b	-0,293	-0,393	-0,353	-0,468	-0,363	-0,379	-0,345	-0,309
c	0,735	0,710	0,704	0,694	0,691	0,691	0,677	0,666
d	-0,645	-0,299	-4,633	-5,517	-8,351	-9,355	-9,048	-9,790

- El segundo término recoge la influencia del nivel de acristalamiento del edificio, y del clima, a través de la radiación solar. Tiene signo negativo, es decir, contrario al de la DC.
- El tercer término recoge la influencia de la ventilación y/o la infiltración del edificio, y del clima, a través de los grados-día. Tiene signo positivo porque contribuye a aumentar la DC.
- En último lugar, se ha añadido un término independiente que recoge la influencia de todos los demás términos de los que depende la DC, como las fuentes internas.

Para la demanda de calefacción, los coeficientes de las correlaciones dependen de la zona climática y de la tipología del edificio. A modo de ejemplo, la tabla 8.6 presenta los posibles coeficientes de calefacción para la ecuación 8.1, para la zona climática correspondiente a Sevilla (B4) y para distintas tipologías de edificios definidas en el programa LIDER.

El estudio de la *Demanda de Refrigeración* (DR) considera como meses de refrigeración: junio, julio, agosto y septiembre. Para el cálculo de la demanda de refrigeración ( $kWh/m^2$ ) se propone la ecuación 8.2.

$$\begin{aligned}
 DR = & a \cdot (U_{m \text{ sin cubierta}} / (V/A_t)) \cdot (altura) \cdot GD_{mes} \cdot (24/1000) \\
 & + b \cdot (U_{cubierta}) \cdot (A_{cubierta} / A_{acondicionada}) \cdot GD \cdot (24/1000) \\
 & + c \cdot (\text{ventilación}) \cdot \rho \cdot Cp \cdot (altura) \cdot GD \cdot (24/3600) \\
 & + d \cdot (\text{ventilación}_{noche}) \cdot \rho \cdot Cp \cdot (altura) \cdot GD_{noche} \cdot (24/3600) \quad (8.2) \\
 & + e \cdot \left(\frac{A_v}{A_a}\right) \cdot g \cdot ASSE \cdot Is \\
 & + f
 \end{aligned}$$

Donde : a, b, c, d, e, f son los coeficientes de la ecuación.

El significado de cada término es el siguiente:

- El primer término recoge la influencia del nivel de aislamiento del edificio, sin contar la cubierta, de su compacidad y del clima, a través de los grados-día. Tiene signo negativo porque contribuye a disminuir la demanda de refrigeración, aunque se observa que su influencia es muy pequeña.
- El segundo término recoge la influencia del nivel de aislamiento de la cubierta del edificio, y del clima, a través de los grados-día modificados. Tiene signo positivo porque contribuye a aumentar la demanda de refrigeración.
- El tercer término recoge la influencia de la ventilación y/o la infiltración del edificio durante las horas diurnas, y del clima, a través de los grados-día. Según la localidad puede tener signo positivo o negativo, pero en ambos casos su influencia es pequeña.
- El cuarto término recoge la influencia de la ventilación y/o la infiltración del edificio durante las horas nocturnas, y del clima, a través de los grados-día-noche. Tiene signo negativo porque contribuye a disminuir la demanda de refrigeración.
- El quinto término recoge la influencia del nivel de acristalamiento del edificio, y del clima, a través de la radiación solar. Tiene signo positivo porque contribuye a aumentar la demanda de refrigeración.

## 8. METODOLOGÍA

---

**Tabla 8.7:** Coeficientes de la correlación de demanda de refrigeración para la zona climática B4 y diferentes tipologías de edificios.

<b>B4</b>	<b>Tipo 1</b>	<b>Tipo 2</b>	<b>Tipo 3</b>	<b>Tipo 4</b>	<b>Tipo 5</b>	<b>Tipo 6</b>	<b>Tipo 7</b>	<b>Tipo 8</b>
<b>a</b>	0,0389	0,0891	0,0642	0,132	0,149	0,124	0,176	0,133
<b>b</b>	0,293	0,312	0,312	0,340	0,305	0,323	0,274	0,301
<b>c</b>	0,527	0,507	0,502	0,520	0,504	0,501	0,485	0,482
<b>d</b>	-0,104	-0,165	-0,179	-0,204	-0,236	-0,235	-0,239	-0,239
<b>e</b>	0,391	0,51	0,541	0,629	0,582	0,614	0,592	0,576
<b>f</b>	17,8	16,7	16,1	12,6	11,2	12,9	13,8	14,3

- En último lugar, se ha añadido un término independiente que recoge la influencia de todos los demás términos de los que depende la demanda de refrigeración, como las fuentes internas.

Para la demanda de refrigeración, los coeficientes de las correlaciones dependen de la zona climática y de la tipología del edificio. A modo de ejemplo, la tabla 8.7 presenta los posibles coeficientes de refrigeración para la ecuación 8.2, para la zona climática correspondiente a Sevilla (B4) y para distintas tipologías de edificios definidas en el programa LIDER.

El ajuste de los coeficientes de un edificio concreto en una zona climática concreta, se obtiene de dividir las demandas de calefacción y refrigeración calculadas con LIDER y con las calculadas con las correlaciones iniciales, como por ejemplo las presentadas en las tablas 8.6 y 8.7. Los coeficientes anteriores se multiplican por dichos coeficientes, de forma que las correlaciones quedan ajustadas para dicho caso denominado caso de referencia.

Los dos modelos presentados son satisfactorios y proporcionan unas estimaciones de los valores de demanda muy cercanos a los calculados mediante simulación. En zonas en las que las demandas son muy pequeñas (por ejemplo localidades de severidad climática de invierno A en calefacción o localidades de severidad climática de verano 2 en refrigeración), el error relativo cometido es mayor, precisamente debido a que se comparan cantidades pequeñas entre sí (de menos de  $10 \text{ kWh/m}^2$ ). Por otra parte en las zonas con valores de demanda mayores (por ejemplo localidades de severidad climática de invierno E en calefacción o localidades de severidad climática de verano 4 en refrigeración) el error relativo es muy pequeño.

Las correlaciones específicas para cada una de las tipologías y para cada zona climática, pueden emplearse para estimar con precisión suficiente los valores de las demandas de calefacción y refrigeración obtenidas mediante simulación. El uso de estas correlaciones está justificado, ya que el ahorro de tiempo en la definición y cálculo del caso son menores en comparación con el tiempo empleado mediante otros métodos de simulación. Además, la pérdida de precisión en los resultados es despreciable en la mayoría de los casos. Por último, cabe destacar que los modelos de cálculo de la demanda son modelos conservadores, por lo que la situación puede ser mejor que la indicada.

### 8.5 Consumo y emisiones

El consumo de energía de un edificio para atender a la demanda de los usuarios, puede ser debido a la calefacción, refrigeración o ACS. El cálculo del consumo viene dado por la expresión 8.3.

$$\text{Consumo Energético} = \frac{\text{Demanda de energía}}{\text{Rendimiento del sistema}} \quad (8.3)$$

La ecuación 8.3 permite conocer las formas en las que se puede actuar para reducir el consumo de los edificios. Las estrategias que se plantean son: disminuir la demanda de energía, aumentar el rendimiento del sistema o actuar en ambas de forma conjunta.

En el cálculo del consumo de un edificio, se debe realizar una distinción debida al tipo de energía, que puede ser primaria o final. La energía primaria es aquella que proviene de una fuente disponible en la naturaleza, mientras que la energía final es la que se consume en nuestros edificios y que por tanto procede de la transformación de la energía primaria. Aunque la energía cumple la ley de conservación, ésta se puede clasificar en distintos tipos de energía: eléctrica, térmica, cinética, etc. La energía disponible en la naturaleza, es un recurso natural en bruto, sin embargo, cada sistemas de producción aporta un mayor o menor aprovechamiento de la misma. De igual forma, surgen diferentes emisiones asociadas a cada combustible, distinguiendo las energías primarias en renovables y no renovables. La calificación

## 8. METODOLOGÍA

---

energética se ve influenciada por la estimaciones del consumo energético, y su correspondiente conversión a emisiones de  $CO_2$ , por lo tanto, si el tipo de energía primaria consumida está basada en fuentes renovables se tendrá un factor neutro de emisiones. En otro caso, su conversión en kilogramos de  $CO_2$  por emisiones debidas a fuentes no renovables, generará un efecto de disminución de la calificación energética obtenida, que está limitada por un máximo de producción marcado por la normativa correspondiente.

El consumo de *Energía Final* (EF), se basa en la ecuación 8.3, definida en la ecuación 8.4. La EF tiene un impacto económico en los usuarios de un edificio.

$$\text{Consumo}_{EF}(kWh/m^2\text{año}) = \frac{\text{Demanda}(kWh/m^2\text{año}) * \frac{100 - \%renovables}{100}}{\eta \text{ (Rendimiento del medio estacional)}} \quad (8.4)$$

El consumo de *Energía Primaria* (EP), se basa en la ecuación 8.5 que depende del consumo de EF y del factor de paso de energía final a energía primaria ( $f_{EF \rightarrow EP}$ ). La EP tiene un impacto energético en el país y conlleva decisiones en la política energética.

$$\text{Consumo}_{EP}(kWh/m^2\text{año}) = f_{EF \rightarrow EP} \cdot \text{Consumo}_{EF}(kWh/m^2\text{año}) \quad (8.5)$$

Las emisiones de  $CO_2$  obedecen a la conversión de energía final a producción o emisión de  $CO_2$ , como se observa en la ecuación 8.6. Tiene un impacto de carácter ambiental en el planeta debido al cambio climático.

$$\text{Emisiones } CO_2\left(\frac{kg \text{ } CO_2}{m^2 \text{ año}}\right) = f_{EF \rightarrow CO_2} \cdot \text{Consumo}_{EP}(kWh/m^2 \text{ año}) \quad (8.6)$$

Donde:

$$f_{EF \rightarrow CO_2} = f_{EF \rightarrow EP} \cdot f_{EP \rightarrow CO_2} \quad (8.7)$$

De los datos de las tablas 8.8, 8.9, 8.10, 8.11, y las ecuaciones 8.4, 8.5, 8.6, 8.7 y teniendo en cuenta que a mayor producción de  $CO_2$  menor calificación energética, se puede concluir que la energía final que más  $CO_2$  produce es la eléctrica en cualquiera de sus formas, por lo que su empleo está muy penalizado de cara a

## 8.5 Consumo y emisiones

obtener buena calificación energética. El uso de energías renovables disminuye la producción de  $CO_2$  y por lo tanto su uso es recomendable en aquellos edificios que pretendan optar a las calificaciones energéticas más elevadas (A o B).

**Tabla 8.8:** Tipos de energía térmica y el factor de emisiones de  $CO_2$ .

Tipo de energía térmica	$f_{EP \rightarrow CO_2}$
Gas natural	0,204 $\frac{kg\ CO_2}{kWh_t}$
Gasóleo-C	0,287 $\frac{kg\ CO_2}{kWh_t}$
GLP	0,244 $\frac{kg\ CO_2}{kWh_t}$
Carbón uso doméstico	0,347 $\frac{kg\ CO_2}{kWh_t}$
Biomasa	neutro
Biocarburantes	neutro
Solar térmica baja temperatura	0

**Tabla 8.9:** Tipos de energía eléctrica y el factor de emisiones de  $CO_2$ .

Electricidad	$f_{EP \rightarrow CO_2}$
Electricidad convencional peninsular	0,649 $\frac{kg\ CO_2}{kWh_e}$
Electricidad convencional extra-peninsular (Baleares, Canarias, Ceuta y Melilla)	0,981 $\frac{kg\ CO_2}{kWh_e}$
Solar Fotovoltaica	0
Electricidad convencional en horas valle nocturnas (0h-8h), para sistemas de acumulación eléctrica peninsular	0,517 $\frac{kg\ CO_2}{kWh_e}$
Electricidad convencional en horas valle nocturnas (0h-8h), para sistemas de acumulación eléctrica extra-peninsular	0,981 $\frac{kg\ CO_2}{kWh_e}$

## 8. METODOLOGÍA

---

**Tabla 8.10:** Tipos de combustible y el factor de paso de energía final a primaria.

Tipo de combustible	$f_{EF \rightarrow EP}$
Gasóleo, Fuel-oil y GLP	1,08 $\frac{kWh_{EP}}{kWh_{EF}}$
Gas Natural	1,01 $\frac{kWh_{EP}}{kWh_{EF}}$
Carbón	1,00 $\frac{kWh_{EP}}{kWh_{EF}}$

**Tabla 8.11:** Tipos de electricidad y el factor de paso de energía final a primaria.

Electricidad	$f_{EF \rightarrow EP}$
Electricidad convencional peninsular	2,61 $\frac{kWh_{EP}}{kWh_{EF}}$
Electricidad convencional extra-peninsular (Baleares, Canarias, Ceuta y Melilla)	3,35 $\frac{kWh_{EP}}{kWh_{EF}}$
Electricidad convencional en horas valle nocturnas (0h-8h), para sistemas de acumulación eléctrica peninsular	2,02 $\frac{kWh_{EP}}{kWh_{EF}}$
Electricidad convencional en horas valle nocturnas (0h-8h), para sistemas de acumulación eléctrica extra-peninsular	3,35 $\frac{kWh_{EP}}{kWh_{EF}}$



### 8.6 Análisis económico

El coste del ciclo de vida es un método de análisis económico de todos los costes relacionados con la construcción, operación y mantenimiento de un proyecto durante un período de tiempo definido. En el análisis se asumen tasas escaladas para dar cuenta de los aumentos en los costes a través del tiempo. Cuando se analiza el análisis económico de un edificio, la solución depende de los pesos relativos entre los diferentes criterios de optimización, siendo uno de ellos, el número de años considerados en el estudio de rentabilidad económica, el coste de la energía, el tipo de interés del dinero utilizado para el cálculo del *Valor Actual Neto* (VAN) y el punto inicial elegido.

El procedimiento de obtención de CCV tiene en cuenta los siguientes costes:

- El coste de inversión, de los elementos constructivos: la transmitancia térmica de los cerramientos (muros, cubiertas y suelos); la transmitancia térmica, el factor solar y la permeabilidad de ventanas; las transmitancias térmicas lineales de puentes térmicos; la permeabilidad y el control de la ventilación.
- El coste de operación debido al consumo energético de las demandas de calefacción y refrigeración del edificio estudiado.
- El coste por emisiones de  $CO_2$  generado por esas demandas.

El cálculo del CCV es la suma del coste de inversión, más el de operación, más el coste por emisiones de  $CO_2$ , que se produce durante los años de vida del edificio. Como indica el suplemento de la Directiva 2010/31/UE (16.1.2012) [European Union, 2012], en los estados miembros se efectuará un análisis para determinar la sensibilidad de los resultados tras el cálculo de los cambios en los parámetros aplicados, cubriendo al menos el impacto de la diferente evolución de los precios energéticos y de las tasas de descuento para los cálculos macroeconómicos y financieros, durante un periodo de 30 años, a ser posible también otros parámetros que se espera que tengan un impacto significativo sobre el resultado de los cálculos, como por ejemplo la evolución de los precios de la energía. Dada la incertidumbre en la evolución del tipo de interés del dinero y del precio del combustible usado, se utilizan pesos relativos estimados.

## 8. METODOLOGÍA

---

$$CCV(€) = Inversión(€) + (Consumo_{total}^{Año\ t}(€) + Coste_{emisiones\ totales}^{Año\ t}(€)) \cdot Anualidad(años) \quad (8.8)$$

Donde:

$$\begin{aligned} Inversión(€) &= \sum_{t=1}^n (Precio_{elemento_i} \cdot Area_{elemento_i}) \\ &\quad + Precio_{mejora\ t\ puentes\ térmicos} \cdot Longitud_{puentes\ térmicos} \\ &\quad + Precio_{estrategia\ ventilación} \\ Consumo_{total}(€) &= \sum_{t=1}^n (Consumo_{calefacción}^{Año\ t}(\frac{€}{año}) + Consumo_{refrigeración}^{Año\ t}(\frac{€}{año})) \\ Coste_{emisiones}^{total}(€) &= \sum_{t=1}^n (Coste_{emisiones\ calefacción}^{Año\ t}(\frac{€}{año}) + Coste_{emisiones\ refrigeración}^{Año\ t}(\frac{€}{año})) \\ Anualidad(años) &= \sum_{t=1}^n ((1 + k_1)^t / (1 + k)^t) \\ Consumo_{Año\ t}(\frac{€}{año}) &= (Demanda_{Año\ t}(\frac{kWh}{año}) / Rendimiento_{sistema}) \\ &\quad \cdot Precio_{energía}^{Año\ t}(\frac{€}{kWh}) \end{aligned}$$

### Cálculo del valor actual neto

Cuando se pretende acometer un proyecto, en este caso una inversión en edificación, previo al desarrollo del proyecto, es necesario determinar si una inversión cumple con el objetivo básico financiero: justificar la inversión. El *Valor Actual Neto* (VAN) determina si dicha inversión puede incrementar o reducir el valor a largo plazo, en base a los flujos de caja futuros, originados por esa inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual (es decir, actualizar mediante una tasa de descuento) todos los flujos de caja futuros del proyecto. A este valor se le resta la inversión inicial, de tal modo que el valor obtenido es el valor actual neto del proyecto. La fórmula que permite calcular el VAN es:

$$VAN = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} \quad (8.9)$$

Donde:

$V_t$  representa los flujos de caja en cada periodo  $t$ .

$I_0$  es el valor del desembolso inicial de la inversión.

$n$  es el número de períodos considerado.

$k$  es el tipo de interés o tasa de descuento.

Si se considera que los flujos de caja anuales son una cantidad fija que se va incrementando con el precio de la energía, pueden ser expresados como  $V_t = R \cdot (1 + k_1)^t$ , por lo que la ecuación 8.9 puede expresarse como 8.10.

$$VAN = I_0 + R \cdot \sum_{t=1}^n \frac{(1 + k_1)^t}{(1 + k)^t} \quad (8.10)$$

Para la ecuación 8.10, se pueden presentar los siguientes supuestos:

- Si el precio de la energía aumentase a mayor ritmo que el tipo de interés, entonces, se podría expresar como:  $k_1 = k + k_2$ .
- Si el precio de la energía aumentase al mismo ritmo que el tipo de interés, entonces, se podría expresar como:  $k_1 = k$ .
- Si el precio de la energía no aumentase a lo largo del periodo considerado, entonces, se podría expresar como:  $k_1 = 0$ .

Si el proyecto no tiene riesgo, se tomará como referencia el tipo de la renta fija, de tal manera que con el VAN se estimará si la inversión es mejor que invertir en algo seguro, sin riesgo específico. En la tabla 8.12 se presenta el significado y decisión a tomar en base al VAN.

Cuando el VAN toma un valor igual a 0, la tasa de descuento  $k$  pasa a llamarse *Tasa Interna de Retorno* (TIR). La TIR es la rentabilidad que proporciona el proyecto.

Para realizar el cálculo del VAN se necesita calcular:

## 8. METODOLOGÍA

---

**Tabla 8.12:** Significado y decisión a tomar en base al VAN.

Valor	Significado	Decisión a tomar
$VAN > 0$	El ahorro producido en el consumo energético es superior a la inversión acometida al seleccionar una nueva epidermis del edificio.	El proyecto puede aceptarse.
$VAN < 0$	El ahorro producido en el consumo energético es inferior a la inversión acometida al seleccionar una nueva epidermis del edificio.	El proyecto debería rechazarse.
$VAN = 0$	El ahorro producido en el consumo energético es igual a la inversión acometida al seleccionar una nueva epidermis del edificio.	La decisión debería basarse en otros criterios, como la obtención de un mejor posicionamiento en el mercado u otros factores.

- El flujo de caja en cada periodo,  $V_t$ , que se calculará como el ahorro en el consumo de energía final tomando como base la situación inicial dada por el CTE-HE1. Es necesario conocer el flujo de caja, o ahorro, inicial, y la evolución de este flujo de caja a lo largo del periodo considerado, es decir, hay que estimar la evolución de los precios de la energía.
- La inversión inicial,  $I_0$ , que se considerará igual al incremento del coste de la alternativa propuesta sobre la situación inicial dada por el CTE-HE1.
- El número de años considerado,  $n$ .
- La estimación de la evolución del tipo de interés,  $k$ .

### 8.7 Proceso de optimización

En primer lugar, se realiza un paso previo una sola vez para cada edificio, en este paso previo se seleccionan los elementos que forman parte de la base de datos de materiales y precios. En segundo lugar se define una situación inicial y se calculan las demandas, en la cual se tomarán las construcciones del CTE-HE1 y los equipos

de referencia de LIDER-CALENER. Una vez obtenida las demandas se calculan los consumos de energía final, primaria, y emisiones de  $CO_2$ , con los cuales se calcula el coste de inversión del edificio y el correspondiente CCV.

Partiendo del diseño, se genera una solución inicial, sobre la que se aplica la meta-heurística tabú, por ser la técnica algorítmica más prometedora ante este tipo de problemas. La meta-heurística obtiene en cada paso una solución mejorada. Los elementos que generan mejora, quedan fijos durante un determinado periodo mientras se realizan los siguientes pasos de resolución, a estos elementos se les denomina tabú. Las soluciones parciales son calculadas con rapidez, gracias al modelo simplificado. La tendencia del algoritmo facilita la mejora continua. El algoritmo tiene un criterio de parada tras un número de pasos sin mejora, en cada ciclo se estudia un sub-espacio de las posibles soluciones del problema. El algoritmo contempla el estudio de las demandas, consumos e inversión respecto de los datos geométricos y de las posibles alternativas aplicables al problema, basadas en la variación de las variables de la tabla 8.2 en cada orientación del edificio. En el estudio de dichas alternativas, son conocidos, mediante una base de datos, los precios de cada elemento constructivo, de la mejora de puentes térmicos, de las estrategias de ventilación, el coste por emisiones de  $CO_2$ , y el precio de la energía. Por otra parte, el rendimiento medio estacional del sistema de calefacción y refrigeración, pueden suponerse constantes y conocidos, esto permite obtener el consumo de energía final. Más adelante se observan las consecuencias de la aplicación de este proceso de optimización. La estructura del algoritmo se expresa en el bloque I, en la sección 4.5.1.2. En las siguientes secciones se presenta la entrada de datos, estructura y funcionamiento.

### 8.7.1 Entrada de la meta-heurística tabú

A continuación se describe la entrada de datos de la meta-heurística:

**Tabú** entero que indica el número de iteraciones en las que no se permite que una variable pertenezca al vecindario. El tamaño del tabú óptimo es dinámico y asociado al número de orientaciones del edificio en estudio, para que se permita diversificar en la búsqueda.

## 8. METODOLOGÍA

---

**Número iteraciones espera** entero que indica el número de iteraciones máximo que se puede iterar sin encontrar una mejor solución.

**Número iteraciones** entero que indica el número de iteraciones hasta finalizar el algoritmo.

**Índices** lista de índices que representa a las variables del problema.

**Tipos** estructura de datos que indica el tipo de variable asociada a los índices.

**Variable** estructura de datos que contiene los posibles valores de las variables.

La estructura del algoritmo diseñado queda como sigue:

```
// 1- Calcula la solución inicial.
Solucion buenaSolucion = situacionInicial();
// 2- Almacena la solución inicial como mejorSolucion del
    algoritmo.
guardarSolucion(buenaSolucion);
// 3- Inicializa la estructura de datos para trabajar con
    vecindarios
Vecindario vecindario;
// 4- Inicia la lista tabú en base a las posibles variables
    de estudio.
iniciarListaTabu(variables);
// 5- Almacena el valor de tabu que se debe aplicar en el
    desarrollo del algoritmo.
listaTabu.setTabu(tabu);
// 6-Mientras no sea el final (no se cumpla el número de
    iteraciones indicado o se supere el límite de iteraciones
    sin mejorar) y sea posible la aplicación del algoritmo (
    es decir, el tamaño del tabú no sea inadecuado) se
    realizaran iteraciones del algoritmo.
while (!esFinal(k,kParado) && listaTabu.esPosible()) {
// 6.1- Se determinan los posibles vecinos en base a los
    valores que no sean tabú.
vecindario = determinarVecindario(buenaSolucion,listaTabu);
// 6.2- Se calcula la solución de los vecinos y se escoge la
    mejor de todas las soluciones.
```

```

buenaSolucion = escogerMejorSolucion(buenaSolucion,
    vecindario);
// 6.3- Si es la mejor solución se almacena y se aplica el
    valor del tabú a la variable (vecino) que ha generado esa
    solución.
if(esMejorSolucion(buenaSolucion)){
    guardarSolucion(buenaSolucion);
    listaTabu.añadeTabu(
buenaSolucion.getVecino().getIdentificador(), tabu);
kParado=0;
}else{
// Incrementa el número de iteraciones sin mejorar
kParado++;
}
// 6.4- Se actualiza la lista de valores tabú
actualizarListaTabu();
// Se modifica el valor del número de iteración
k=k+1;
}

```

## 8.8 Proceso de resolución

En primer lugar se genera una solución inicial, en este caso los valores de estudio de la solución inicial vienen definidos por el usuario.

A partir de la solución inicial se genera el vecindario. Para generar el vecindario, se le indica al algoritmo el conjunto de índices que representan las variables que son modificables en el algoritmo, en este caso:

- $u_{Cubierta}$
- $u_{Suelo}$
- $u_{Muro(Norte)}, u_{Muro(Este)}, u_{Muro(Sur)}, u_{Muro(Oeste)}, \dots$
- $u_{Ventana(Norte)}, u_{Ventana(Este)}, u_{Ventana(Sur)}, u_{Ventana(Oeste)}, \dots$
- $p_{Ventana(Norte)}, p_{Ventana(Este)}, p_{Ventana(Sur)}, p_{Ventana(Oeste)}, \dots$

## 8. METODOLOGÍA

---

- $a_{Ventana(Norte)}, a_{Ventana(Este)}, a_{Ventana(Sur)}, a_{Ventana(Oeste)}, \dots$
- $PuenteTermico$

Mediante este conjunto de índices se permite generar N muros. Los posibles valores de estudio a partir de los cuales se genera el vecindario están limitados por un valor máximo y mínimo, entre los cuales se obtienen los valores de estudio de una base de datos:

- $MAXuCubierta, MINuCubierta$
- $MAXuSuelo, MINuSuelo$
- $MAXuMuros, MINuMuros$
- $MAXuVentanas, MINuVentanas$
- $MAXpVentanas, MINpVentanas$
- $MAXaVentanas$  (por orientación),  $MINaVentanas$  (por orientación)
- $MAXopcionPuentesTermicos, MINopcionPuentesTermicos$

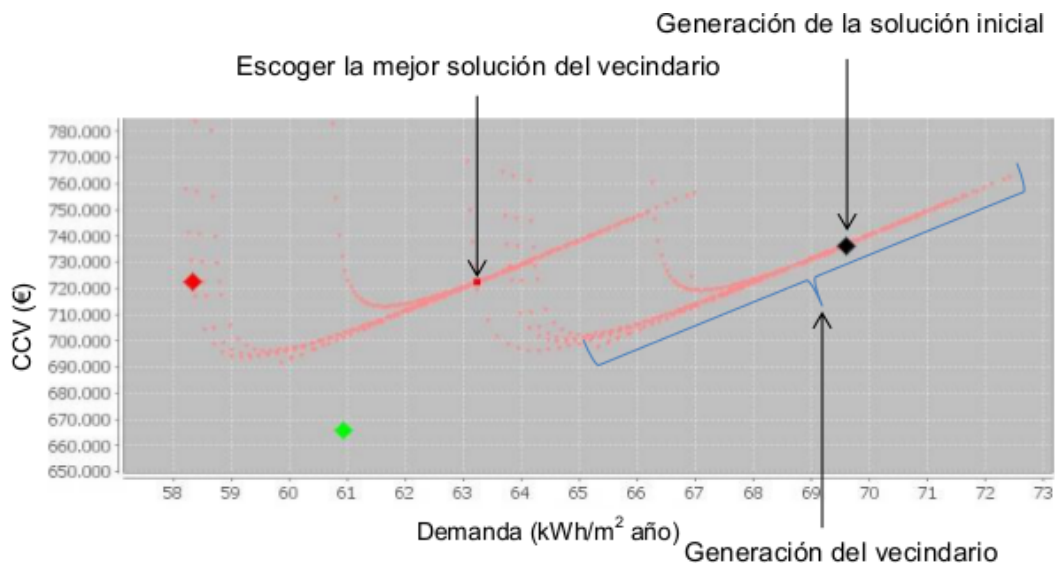
Esto permite convertir las variables en constantes, pues si los valores máximo y mínimo generan un conjunto vacío para una variable de estudio, este valor no genera vecinos y por tanto hace el efecto de ser una constante.

Por último, se escoge la mejor solución del vecindario, se han desarrollado algoritmos en base a los siguientes criterios:

- Mínimo coste del ciclo de vida.
- Obtención de una calificación energética
- Mínimo consumo de calefacción para un coste del ciclo de vida menor o igual al de la solución inicial.



En la figura 8.2 se puede observar un ejemplo de dos iteraciones del algoritmo. El algoritmo, selecciona la mejor solución, con este propósito, se comprueba si la mejor solución del vecindario es mejor que la mejor solución del algoritmo, para ello se aplican los mismos tres criterios, mencionados con anterioridad. El algoritmo, tiene definido un criterio de parada, éste permite que el algoritmo sea lo más autónomo posible, se utilizan criterios de parada auto-ajustables (número de iteraciones sin mejorar) junto con fijos (número máximo de iteraciones).

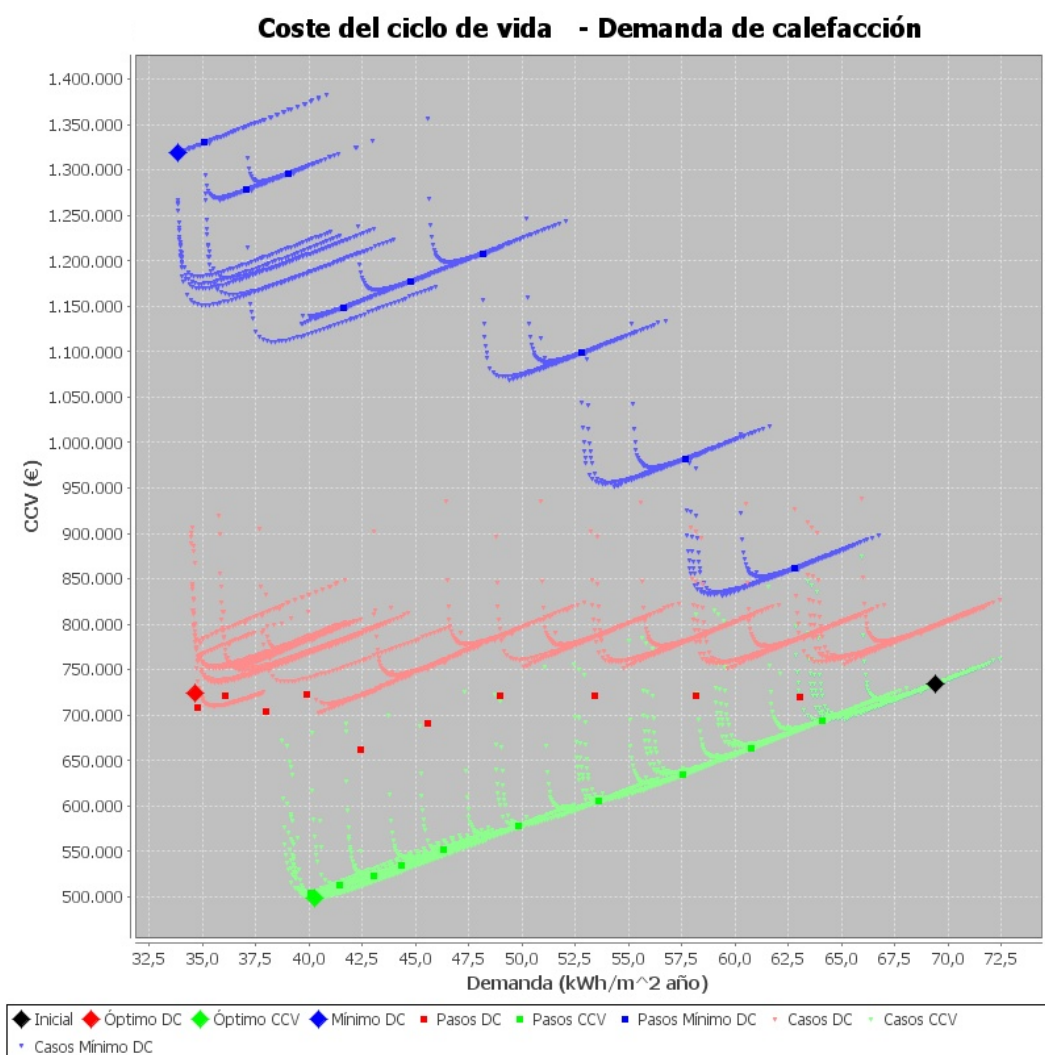


**Figura 8.2:** Iteraciones del algoritmo TS.

Se pueden aplicar diversas búsquedas de resolución, en la figura 8.3 se representa el CCV(€) frente a la demanda en ( $\frac{kWh}{m^2 \text{ año}}$ ). Se simboliza el punto de partida del problema con un rombo negro. A partir de éste surgen las soluciones de mínima demanda de calefacción (azul), mínimo coste del ciclo de vida (verde) y mínima demanda de calefacción para un coste del ciclo de vida menor o igual a la solución inicial (rojo).

La figura 8.3 representa en tonalidades de verde el mínimo coste del ciclo de vida. La solución inicial se simboliza con un rombo negro. Los pequeños triángulos de color verde representan los valores estudiados en la búsqueda de la mejor solución. En cada iteración se encuentra una mejor solución que esta simbolizada por un cuadrado verde, finalmente el valor óptimo se representa con un rombo verde. Igualmente, en tonalidades de color rojo se representa la mínima demanda

## 8. METODOLOGÍA



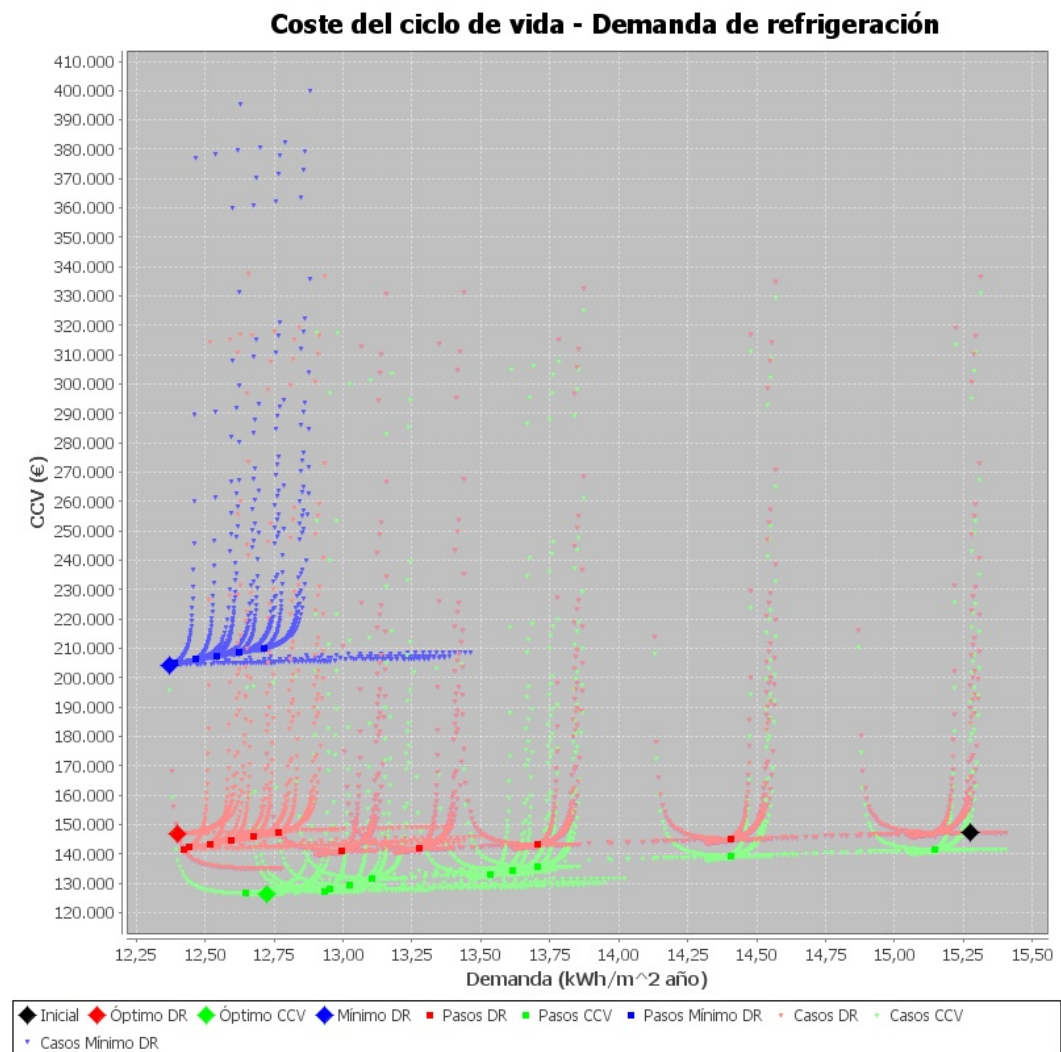
**Figura 8.3:** CCV frente a la DC.

de calefacción para un coste del ciclo de vida menor o igual a la solución inicial. La solución inicial se simboliza con un rombo negro. Los pequeños triángulos de color rojo representan los valores estudiados en la búsqueda de la mejor solución. En cada iteración se encuentra una mejor solución que está simbolizada por un cuadrado rojo, finalmente el valor óptimo se representa con un rombo rojo. Por último, en tonalidades de color azul se representa la mínima demanda de calefacción. La solución inicial se simboliza con un rombo negro. Los pequeños triángulos de color azul representan los valores estudiados en la búsqueda de la mejor solución. En ca-

da iteración se encuentra una mejor solución que está simbolizada por un cuadrado azul, finalmente el valor óptimo se representa con un rombo azul.

A continuación se presentan gráficas asociadas a soluciones de diversos edificios, la intención es presentar las posibilidades de estudio de esta metodología, por lo que los valores de las gráficas serán diversos, dado que algunos se refieren a viviendas unifamiliares y otros a edificios de bloque.

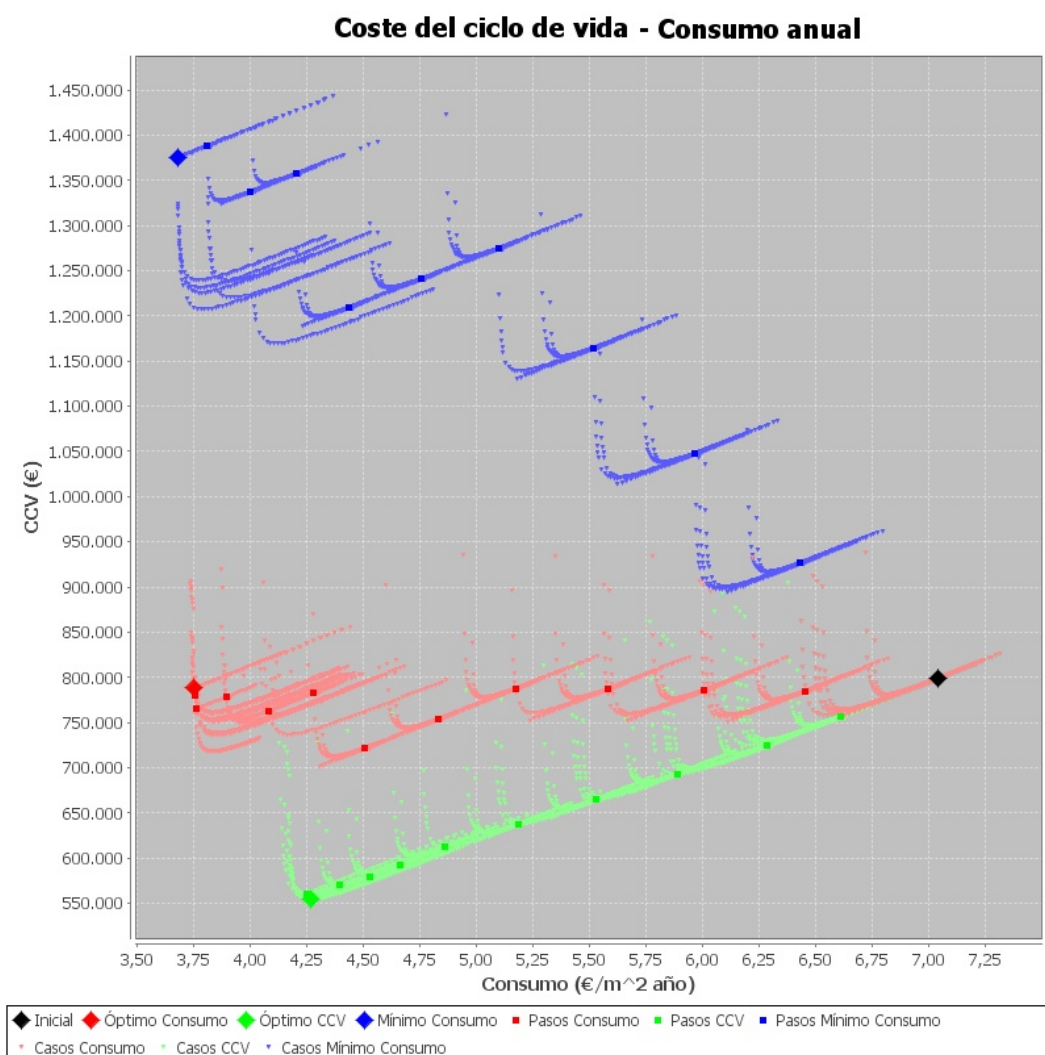
En la anterior figura 8.3 se ha presentado una comparativa CCV-DC, a continuación se presenta una comparativa entre el CCV y la DR, figura 8.4.



**Figura 8.4:** CCV frente a la DR.

## 8. METODOLOGÍA

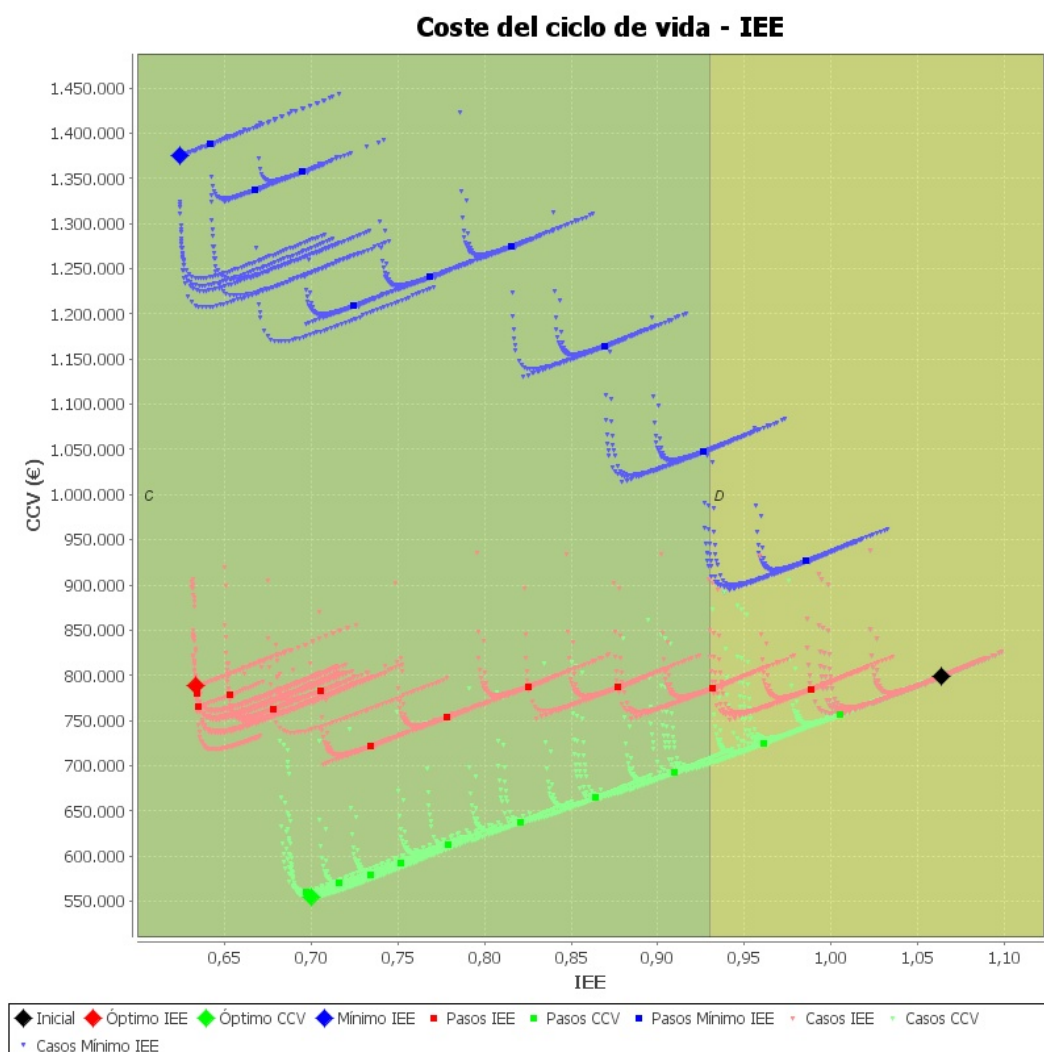
En la figura 8.5 se representa el CCV(€) frente al consumo energético anual ( $\frac{€}{m^2 \text{ año}}$ ). Se simboliza el punto de partida del problema con un rombo negro. A partir de éste surgen las soluciones de mínimo consumo de calefacción (azul), mínimo coste del ciclo de vida (verde) y mínimo consumo de calefacción para un coste del ciclo de vida menor o igual a la solución inicial (rojo).



**Figura 8.5:** CCV frente al consumo.

Para el mismo edificio de la gráfica 8.5, se puede representar la comparativa respecto del índice de eficiencia energética, IEE. La figura 8.6 representa el CCV(€) frente al IEE (adimensional). En la figura se simboliza el punto de partida del pro-

blema con un rombo negro. A partir de éste surgen las soluciones de mínimo IEE (azul), mínimo coste del ciclo de vida (verde) y mínimo IEE para un coste del ciclo de vida menor o igual a la solución inicial (rojo).



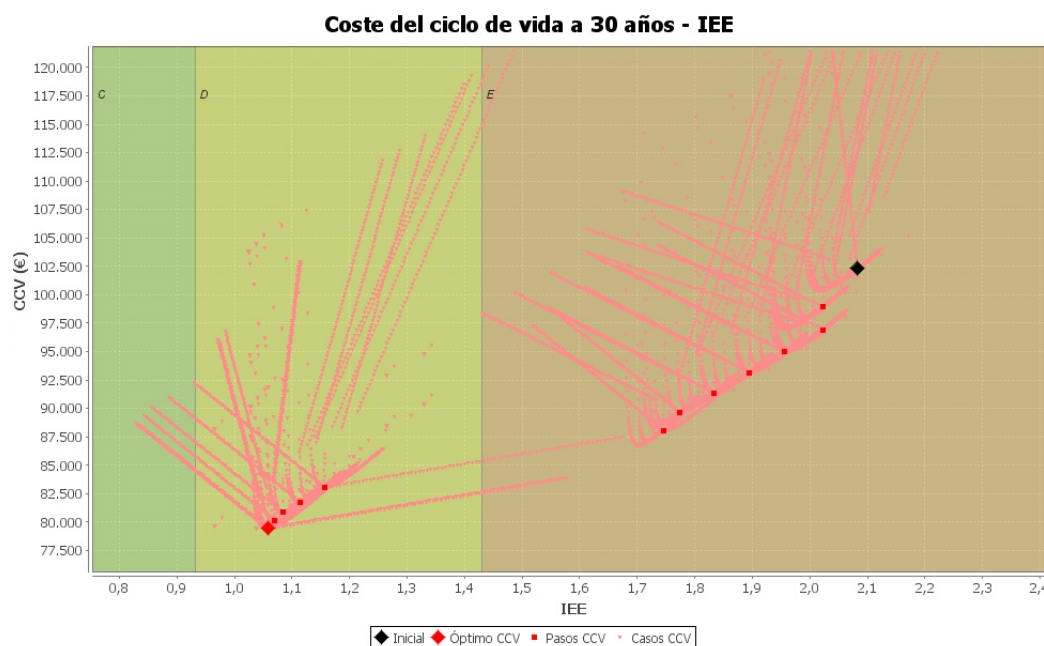
**Figura 8.6:** CCV frente al IEE.

En la figura 8.7, se puede observar como la optimización del CCV de un edificio, es un criterio de búsqueda válido, sin embargo, a partir del punto óptimo, el CCV aumenta si se quiere mejorar el IEE. Por esta razón, tanto en el programa, como en la metodología, se ha optado por el menor CCV en la búsqueda de una cierta calificación energética. En la figura 8.7, podría ser elegido un caso de mínimo CCV



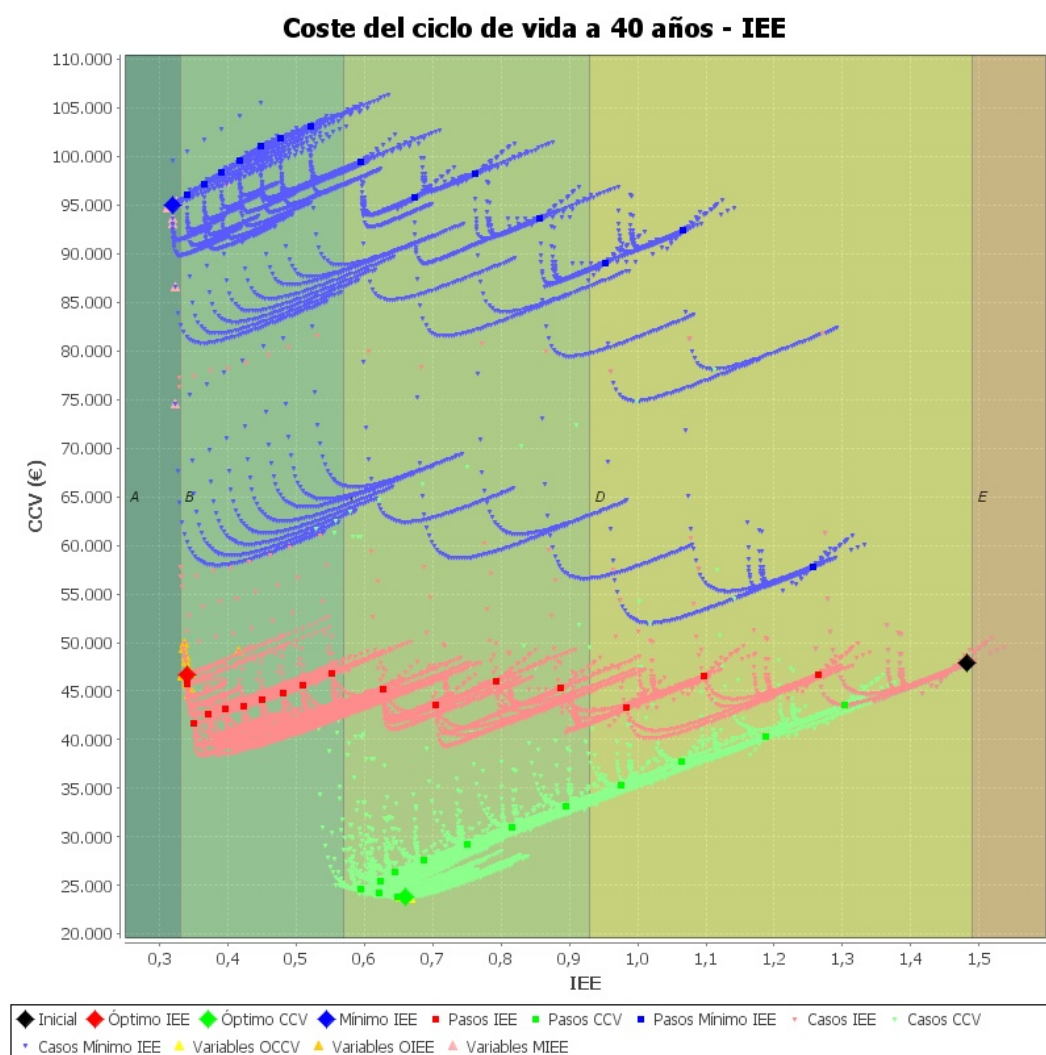
## 8. METODOLOGÍA

que tuviera calificación energética C, y estando en la frontera entre ambas letras, su coste sólo supondría aproximadamente 5.000€, es decir, aproximadamente un aumento del coste del 6.25 %.



**Figura 8.7:** CCV frente al IEE.

La figura 8.8 representa un ejemplo de edificio, el cual puede ser mejorado en su calificación energética, sin la aplicación de sistemas, sin embargo, como se puede observar, pasar de una letra C a una letra A, una vivienda unifamiliar residencial, puede multiplicar por cuatro el coste de su ciclo de vida.



**Figura 8.8:** CCV frente al IEE.

## 8.9 Calificación energética

El etiquetado energético de los edificios, consiste en asignar una etiqueta de eficiencia energética al edificio, en base a una escala. La escala se define mediante la fijación de los valores de transición entre un nivel o letra y otro. La tabla 8.13 muestra los límites de una escala de 7 bandas en la curva de distribución del *Índice de Eficiencia Energética* (IEE).

El IEE de la tabla 8.13 cubren la mayoría de los edificios destinados a vivienda, tanto los unifamiliares como en bloque, por lo que se ha aplicado en la realización

## 8. METODOLOGÍA

---

**Tabla 8.13:** Límites de la escala de valores del IEE.

Valor	Descripción
0,371460	IEE límite entre A y B
0,599485	IEE límite entre B y C
0,930489	IEE límite entre C y D
1,430673	IEE límite entre D y E
2,427363	IEE límite entre E y F
2,912835	IEE límite entre F y G

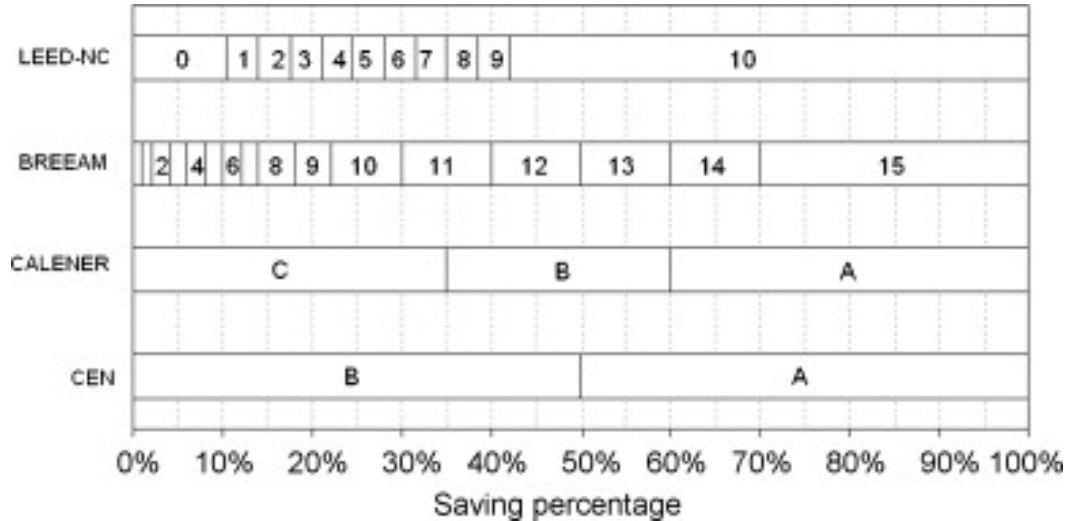
de pruebas y ejemplos de la metodología. Además, ésta es válida para las soluciones técnicas de las 12 zonas climáticas en las que se ha subdividido la geografía española en el CTE-HE1. Las únicas limitaciones a su empleo son las derivadas de la aplicabilidad de la opción simplificada del CTE-HE1. Esto quiere decir, que puede ser utilizada cuando se cumplan simultáneamente las condiciones de que el porcentaje de huecos en cada fachada sea inferior al 60 % de su superficie, y que el porcentaje de lucernarios sea inferior al 5 % de la superficie total de la cubierta. Con la excepción de viviendas con porcentajes de huecos superiores al 60 % en aquellas fachadas cuyo área suponga un porcentaje inferior al 10 % del área total de las fachadas del edificio.

Pese a que esta metodología aplica los criterios expresados anteriormente. Los criterios para establecer la escala son subjetivos, por lo que se pueden ver más afectados por las decisiones políticas que por el análisis técnico. Por esta razón, como se puede ver en la figura 8.9 [Pérez-Lombard et al., 2009] existe una gran disparidad entre las diferentes escalas existentes, como presenta la CEN establecida en la normativa europea, el CALENER que es la certificación energética española, el BREEAM para la certificación de oficinas y el estadounidense LEED-NC.

Aun así, existen otros indicadores, como el uso de energía por unidad de superficie y año que es casi un estándar para edificios. Aunque se deben decidir las magnitudes de consumo de energía (energía suministrada, la energía primaria, las emisiones de  $CO_2$  o el coste de energía )



## 8.9 Calificación energética



**Figura 8.9:** Diferentes escalas de calificación energética [Pérez-Lombard et al., 2009].

### 8.9.1 Cálculo del IEE

El IEE se puede aplicar sin riesgo de error en las soluciones técnicas de los edificios, debido a que el IEE se calcula a partir de demandas ajustadas de forma conservadora.

El IEE global depende de indicadores intermedios basados en la formula 8.11.

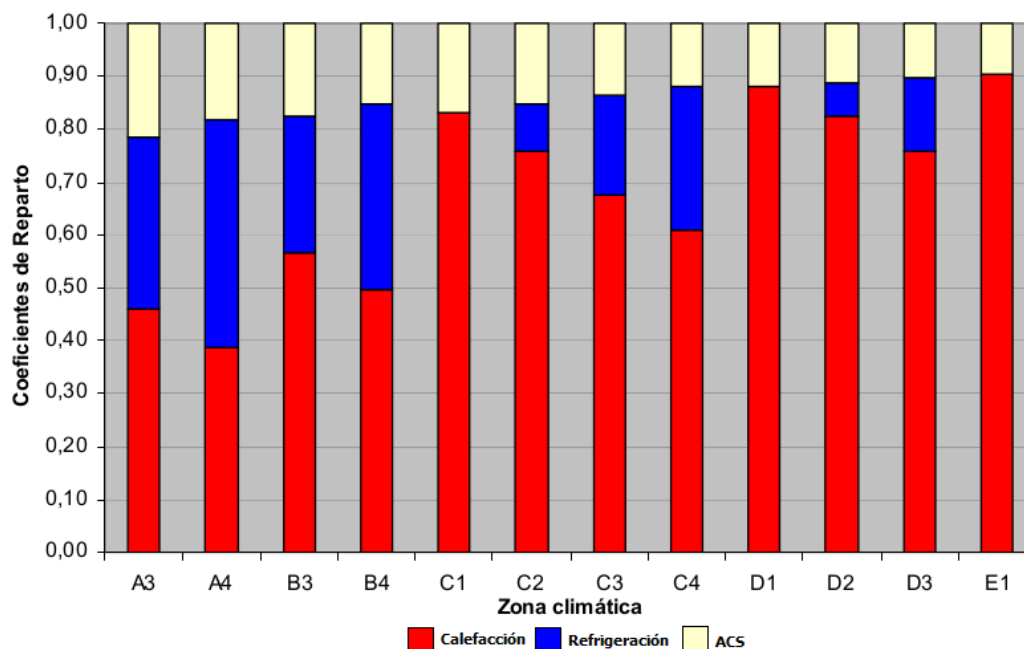
$$IEE_{global} = IEE_{calefacción} \cdot \Phi_{calefacción} + IEE_{refrigeración} \cdot \Phi_{refrigeración} + IEE_{ACS} \cdot \Phi_{ACS} \quad (8.11)$$

Donde:  $IEE_{calefacción}$ ,  $IEE_{refrigeración}$  e  $IEE_{ACS}$  son, respectivamente, los indicadores correspondientes a las emisiones de  $CO_2$  de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria para el edificio objeto. Y  $\phi_{calefacción}$ ,  $\phi_{refrigeración}$  y  $\phi_{ACS}$  son, respectivamente, los coeficientes de reparto correspondientes a las emisiones de  $CO_2$  de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria de referencia.

Los coeficientes de reparto dependen de la localidad y del tipo de edificio de vivienda (unifamiliares o en bloque) y su suma, en cada caso, es igual a la unidad. En la figura 8.10 se presentan los coeficientes de reparto de viviendas unifamiliares en las diferentes zonas climáticas.

A su vez, cada uno de los indicadores intermedios depende de la demanda correspondiente, del rendimiento medio estacional de la instalación ( $\eta$ ) y del tipo de

## 8. METODOLOGÍA



**Figura 8.10:** Coeficientes de reparto en viviendas unifamiliares.

energía utilizada (a través del coeficiente de paso a emisiones de  $CO_2$ ), mediante la relación 8.12.

$$IEE_x = IEE_x^{\text{demanda}} \cdot IEE_x^{\text{sistemas}} = \frac{\text{Demanda}_{x|\text{objeto}}}{\text{Demanda}_{x|\text{referencia}}} \cdot \frac{\frac{\text{coef.paso}}{\eta_{\text{Sistema}x|\text{objeto}}}}{\frac{\text{coef.paso}}{\eta_{\text{Sistema}x|\text{referencia}}}} \quad (8.12)$$

Donde:

$x$  es calefacción, refrigeración o ACS

### Indicador de eficiencia energética de demanda

$$IEE_{Dx} = \frac{\text{Demanda de } x_{\text{edificio objeto}}}{\text{Demanda de } x_{\text{edificio referencia}}} \quad (8.13)$$

Donde:

$x$  es calefacción, refrigeración o ACS

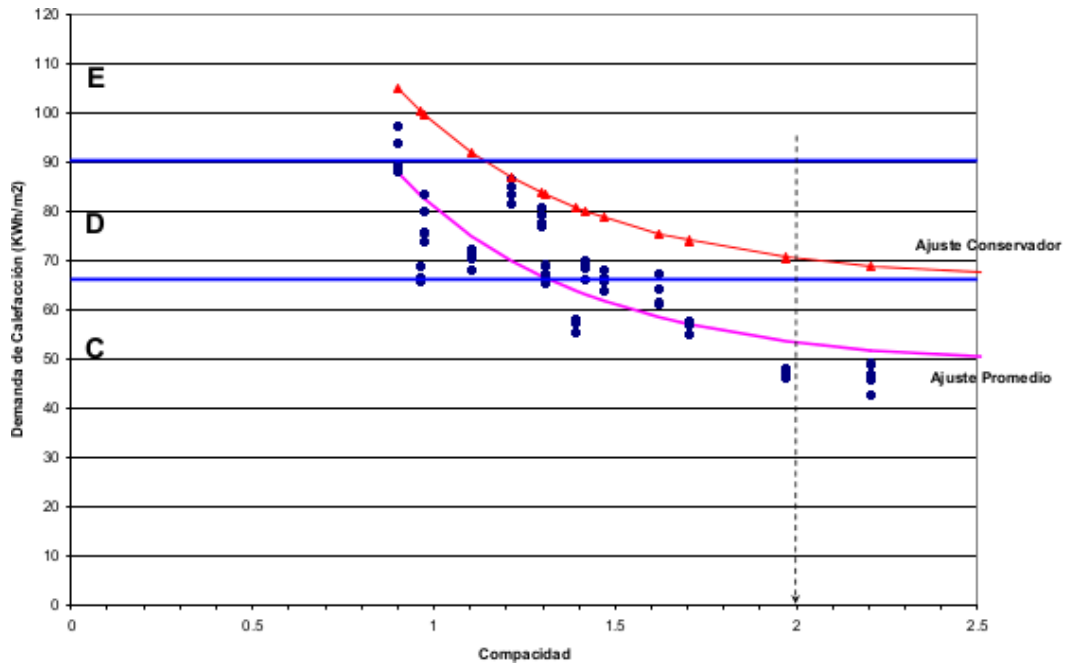
### Indicador de eficiencia energética del sistema

$$IEE_{Sx} = \frac{\frac{1}{\text{Rendimiento del sistema de } x_{\text{edificio objeto}}}}{\frac{1}{\text{Rendimiento del sistema de } x_{\text{edificio referencia}}}} \quad (8.14)$$

Donde:

$x$  es calefacción, refrigeración o ACS

En definitiva, conociendo los coeficientes de reparto es posible obtener la eficiencia para el indicador global a través de los indicadores intermedios.



**Figura 8.11:** Distribución frente a la compacidad de las demandas de calefacción de viviendas unifamiliares, situadas en Madrid [Ministerio de industria, energía y turismo, 2013].

En la memoria [Ministerio de industria, energía y turismo, 2013] se presenta una muestra de edificios que se describen, y sobre los que se aplican los indicadores anteriormente definidos. En el documento, se presentan las estimaciones correspondientes a las demandas de calefacción y refrigeración, en función de la compacidad. Aunque, como se puede observar en los resultados del documento, en

## 8. METODOLOGÍA

---

principio, los edificios se distribuyen entre las clases A, B, C, D y E, las correlaciones que se aplican en los edificios, al igual que en este estudio, son soluciones conservadoras (la figura 8.11 sirve de ejemplo de cómo los ajustes aplicados son conservadores).

### 8.9.2 Sistemas

Las prestaciones medias estacionales de un sistema térmico no dependen exclusivamente de sí mismo (tipo y prestaciones nominales), sino que son función además del:

- Clima
- Edificio donde está instalado (que condiciona la carga parcial)
- Dimensionado (o más bien sobredimensionado) de su potencia

Puesto que estos tres elementos condicionan las prestaciones medias estacionales, su tipificación debe hacerse en principio para una familia de edificios concreta (tales como las viviendas unifamiliares, los bloques de viviendas o edificios de uso terciario), para cada clima concreto y bajo unos escenarios concretos de dimensionado de la potencia punta.

La prestación media estacional,  $\eta$ , varía dependiendo del sistema. Para el estudio, la metodología debe contemplar calderas, sistemas basados en biomasa, sistemas mixtos y de aire acondicionado. Además, ésta debe permitir sistemas con diversidad de combustibles y tipos de electricidad, como se observó en las tablas 8.8, 8.9, 8.10 y 8.11.

La eficiencia de los sistemas de refrigeración y de las bombas de calor se denomina coeficiente de prestaciones (COP, *Coefficient Of Performance*), este factor permite comparar los consumos de energía para el funcionamiento de diferentes alternativas de calefacción o refrigeración. Cuando los sistemas de bomba de calor, trabajan como refrigeración aprovechando el calor extraído en el evaporador para proporcionar un fluido frío (aire, agua o el propio refrigerante del circuito frigorífico) es cuando se define como ratio de eficiencia energética (EER, *Energy Efficiency Ratio*).

## 8.9 Calificación energética

En las tablas 8.14, 8.15 y 8.16, se presentan los datos que facilitan a los fabricantes la aplicación de la metodología, mediante los datos de las prestaciones nominales de las calderas,  $\eta$ , las bombas de calor, COP y los equipos de refrigeración, EER, y de los factores de ponderación de las tablas de los factores de ponderación de los sistemas de calefacción (ejemplo tabla 8.17) y de refrigeración (ejemplo tabla 8.18), se puede calcular las prestaciones medias estacionales necesarias en la relación 8.12.

**Tabla 8.14:** Ejemplo de datos del fabricante de un sistema de calderas.

<b>MARCA</b>	SAUNIER DUVAL
<b>TIPO</b>	CONDENSACIÓN
<b>MODELO</b>	THERMOSYSTEM CONDENS 280/3
<b>COMBUSTIBLE</b>	G.N.
<b>SERVICIO</b>	CALEFACCIÓN
$T^a$ MEDIA (1)	70
P. MÍN.	51
P. MÁX.	275,5
RENDIMIENTO	98,4
$T^a$ MEDIA (2)	50
P.MÍN.	52,3
P.MÁX.	281,4
RENDIMIENTO	100,5
$T^a$ MEDIA (3)	
P.MÍN.	
P.MÁX.	
RENDIMIENTO	
$T^a$ MEDIA (4)	35
P. MÍN.	54,7
P.MÁX.	294,3
RENDIMIENTO	105,1
$T^a$ MEDIA	30
RENDIMIENTO (30 % Pn)	108
PRECIO	14965
FIABILIDAD DATOS	2012

## 8. METODOLOGÍA

---

**Tabla 8.15:** Ejemplo de datos del fabricante de un sistema basado en biomasa.

MARCA	HERZ
MODELO	PELLETSTAR20
USO	CALEFACCION
COMBUSTIBLE	PELLET
TEMP.IMPUL. (° C)	53,4
TEMP. RET. (° C)	74,1
FACTOR DE CARGA ( % )	29,7
POTENCIA C.P.(kW.)	6,2
RENDIMIENTO C.P.( % )	90,5
TEMP.IMPUL. (° C)	52,4
TEMP. RET. (° C)	73,7
FACTOR DE CARGA( % )	101,1
POTENCA NOM.(kW.)	21,2
RENDIMIENTO P.N.( % )	93
COMPROB. FRACCION DE CARGA PARCIAL	29
VOL. INTERNO (l.)	76
PRECIO (€)	9108

**Tabla 8.16:** Ejemplo de datos del fabricante de un sistema de aire acondicionado.

MARCA	FUJITSU
MODELO	ASY 25 UI LT
(UNIDAD INTERIOR/UNIDAD EXTERIOR)	ASY 25 UI LT
SERVICIO	FRIO/CALOR
TIPO	SPLIT
TIPO DE DESCARGA	PARED
POT. TOTAL (kW.)	2,5
EER (FRIO)	4,72
CLASE	A
POT. TOTAL (kW.)	3,2
COP (CALOR)	4,74
CLASE	A
REFRIGERANTE	R410A
TIPO DE COMPRESOR	SCROLL
PRECIO	1289

## 8.9 Calificación energética

**Tabla 8.17:** Factores de ponderación para sistemas de calefacción por bomba de calor.

<b>Zona Climática</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
Equipos centralizados (viviendas unifamiliares)	0,790	0,710	0,710	0,680	0,680
Equipos centralizados (viviendas en bloque)	0,790	0,750	0,750	0,680	0,680
Equipos individuales tipo split (viviendas individuales y viviendas en bloque)	0,600	0,620	0,620	0,580	0,580
Bombas de calor geotérmicas con intercambiadores verticales (viviendas unifamiliares)	1,127	1,125	1,073	1,012	0,951
Bombas de calor geotérmicas con intercambiadores verticales (viviendas en bloque)	1,131	1,116	1,072	1,008	0,937
Bombas de calor geotérmicas con intercambiadores horizontales (viviendas unifamiliares)	0,949	0,920	0,876	0,824	0,766

**Tabla 8.18:** Factores de ponderación para sistemas de refrigeración.

<b>Zona Climática</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Equipos centralizados (viviendas unifamiliares)	0,800	0,710	0,780
Equipos centralizados (viviendas en bloque)	0,900	0,800	0,880
Equipos individuales tipo split (viviendas individuales y viviendas en bloque)	0,540	0,660	0,750
Bombas de calor geotérmicas con intercambiadores verticales (viviendas unifamiliares)	1,562	1,415	1,309
Bombas de calor geotérmicas con intercambiadores verticales (viviendas en bloque)	1,577	1,445	1,332
Bombas de calor geotérmicas con intercambiadores horizontales (viviendas unifamiliares)	1,125	1,042	0,974

### 8.10 Conclusiones

La metodología presentada es el eje central de este bloque, como se puede observar la metodología no da lugar a la ambigüedad. En primer lugar se ha definido el esquema metodológico por el cual se optimizan los edificios. En segundo lugar, se han mostrado los elementos que definen el edificio y las variables consideradas en la resolución del problema, para esta metodología, definidos en el capítulo anterior, por supuesto, queda clara la importancia de la preparación del usuario para definir el edificio y los parámetros que repercuten en el algoritmo. En tercer lugar se han presentado los cálculos que definen el modelo simplificado, con los cuales se define la demanda del edificio, el modelo simplificado es conservador, por tanto la demanda real será inferior a la definida por el modelo, esto permite asegurar que la calificación energética será en el peor de los casos la obtenida. En cuarto lugar, a partir de la demanda, se calcula el consumo, las emisiones y el coste de vida del edificio. En quinto lugar, se ha definido el proceso de resolución algorítmico aplicado, la búsqueda tabú resulta ser una metaheurística rápida y eficiente para problemas de alta complejidad, como se observó en la introducción de esta técnica que se realizó en el bloque anterior. En sexto lugar, se definen los cálculos que permiten obtener el índice de eficiencia energética, por el cual se obtiene un resultado conservador, por último, se pueden mejorar los resultados de la metodología mediante el uso de sistemas como se observará en el capítulo de resultados.



*Si buscas resultados distintos, no  
hagas siempre lo mismo.*

Albert Einstein

CAPITULO

# 9

## **Mejora en la edificación sostenible: resultados y discusión**

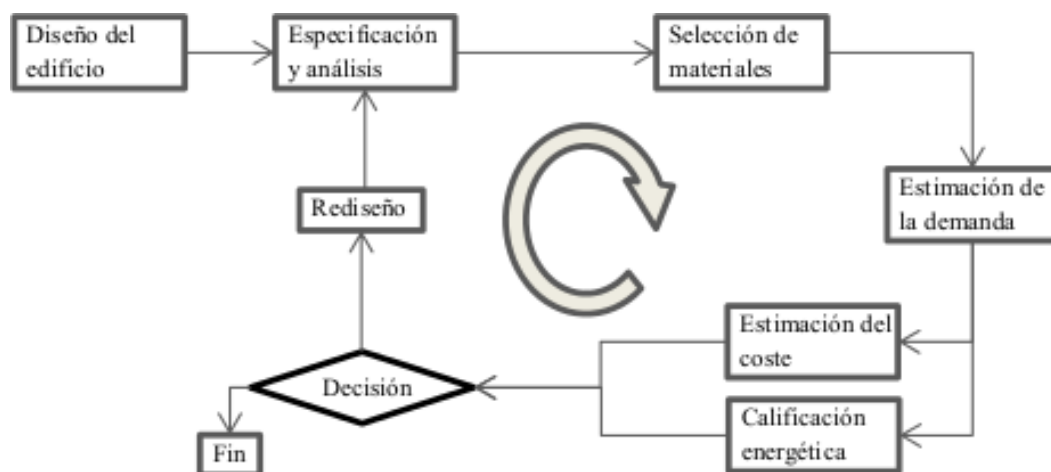
Para diseñar un edificio de baja energía se requiere la evaluación de un gran número de combinaciones de parámetros. Actualmente, hay programas disponibles que están diseñados para calcular el rendimiento energético y el coste del ciclo de vida. Sin embargo, estos programas dan poca información sobre qué y cuánto se puede mejorar. Utilizar un programa iterativo para optimizar los parámetros es una solución, pero es lento si la base de datos crece mucho. Este estudio aplica la metodología presentada en el capítulo 8, basada en la búsqueda tabú y un método simplificado para el cálculo de la demanda. Una búsqueda tabú es un buen método para evitar los mínimos locales y para permitir la evaluación de diferentes soluciones. La metodología está diseñada para estimar la demanda, el coste del ciclo de vida y la calificación energética. En éste capítulo se presentan 48 escenarios diferentes que fueron analizados con el sistema desarrollado, como ejemplos significativos del funcionamiento de la aplicación.

## 9. MEJORA EN LA EDIFICACIÓN SOSTENIBLE: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 9.1 Mejora del proceso de diseño

En el proceso de diseño de un edificio, el arquitecto selecciona las diferentes configuraciones de los materiales de construcción y los utiliza para estimar con precisión la demanda de energía prevista. Para este propósito, existen diversas herramientas de análisis disponibles, sobre la base de los sistemas de información, que permiten al usuario evaluar estrategias y sistemas de energía alternativa [Stumpf et al., 2009]. Este tipo de tecnología se encuentra todavía en una etapa de desarrollo, y aún no se aprovecha plenamente debido a la complejidad y los enormes costes que supone la construcción de modelos [Eastman et al., 2008].

La figura 9.1 presenta el proceso de diseño tradicional. En primer lugar, el usuario genera un diseño del edificio, y luego selecciona el tipo de edificio, la zona climática junto a otras especificaciones para el análisis. Con esta información, la demanda del edificio se puede calcular, su coste estimado y la calificación energética. Si el usuario quiere mejorar este diseño, él debe decidir y modificar los elementos de diseño, generándose un nuevo ciclo de diseño y cálculo, hasta obtener un resultado satisfactorio. Esta búsqueda combinatoria es muy lenta, aumenta los costes y el tiempo requerido para el proceso de diseño.



**Figura 9.1:** Proceso tradicional.

El desarrollo de la metodología expuesta en el capítulo 8, ha permitido modificar el proceso de diseño. La figura 9.2 presenta este nuevo proceso que permite al usuario hacer cambios o rediseños sólo en la estructura del edificio. La herramienta

proporciona una combinación eficiente de los elementos de construcción para un criterio dado por el usuario. Los elementos de este proceso, son introducidos por el usuario y por tanto la solución aportada será acorde a los elementos constructivos que el usuario quiere utilizar para su diseño.

El diseño del sistema para el nuevo proceso, se ha basado en los siguientes pasos:

1. Identificar el entorno en el que el sistema experto se quiere construir.
2. Determinar el papel que el sistema experto tiene en el proceso.
3. Identificar las capacidades específicas necesarias para el sistema experto dentro del ambiente identificado en el Paso 1.
4. Desarrollar un diseño conceptual del sistema experto.
5. Basado en el diseño conceptual, determinar los recursos necesarios para construir el sistema experto.
6. Crear el sistema experto y proporcionar apoyo continuo.

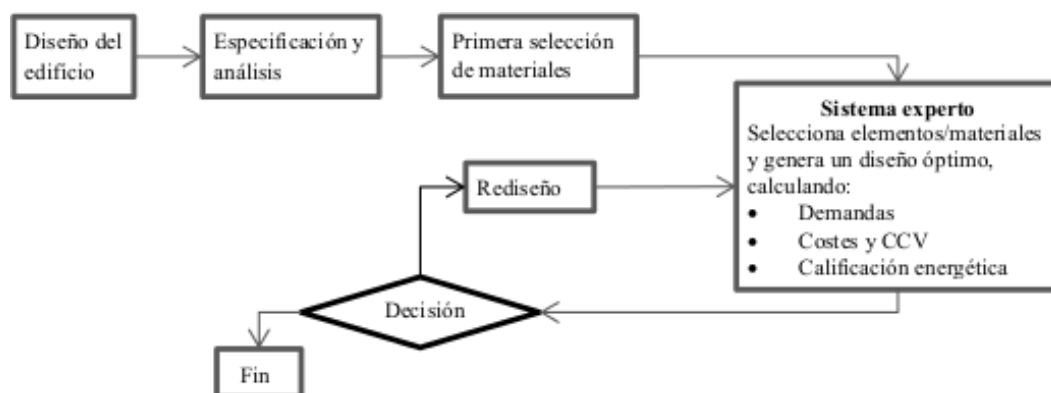
El sistema experto desarrollado se basa en la simulación, y permite al usuario evaluar y estudiar los objetivos y las cuestiones de diseño antes de que comience la construcción, además, ayuda en el estudio y la identificación de soluciones y alternativas. También permite al usuario realizar un análisis de sensibilidad para probar rápidamente las ventajas y desventajas económicas de los cambios incorporados al proyecto mediante la evaluación de los cambios de acuerdo con los objetivos establecidos y los criterios generales.

El conjunto de actividades que forman parte del nuevo proceso (figura 9.2) son las siguientes:

1. Diseño del edificio: El usuario crea un modelo de referencia. El arquitecto o diseñador (usuario), construye un modelo de referencia (inicial) sobre la base de un conjunto fijo de variables independientes relacionadas con la ubicación del edificio, que es generalmente aceptado en el CTE.

## 9. MEJORA EN LA EDIFICACIÓN SOSTENIBLE: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---



**Figura 9.2:** Proceso actual.

2. Especificación y análisis: El usuario selecciona el tipo de edificio, la zona climática, y otras especificaciones y parámetros de análisis.
3. Primera selección de materiales: El usuario selecciona un primer grupo de elementos y materiales.
4. Sistema experto: El arquitecto o diseñador ejecuta el sistema experto, que contiene un modelo simplificado de análisis. Este modelo simplificado calcula en base a un criterio, por ejemplo la calificación energética y el CCV. En primer lugar, se inserta el diseño inicial del edificio, y a continuación, el usuario selecciona los elementos de la estructura, que puede variar en el análisis, que a su vez corresponden a las variables del modelo. Los datos almacenados en una base de datos de propiedades y precios para los diferentes elementos constructivos, permiten al sistema experto obtener la solución óptima, representada por sus elementos/materiales, y un informe de la demanda estimada, los costes estimados y calificación energética. El sistema funciona según el esquema metodológico del apartado 8.1:
  - (a) Análisis y estudio de sensibilidad: El sistema verifica los posibles valores tomados por las variables, así como el efecto de las variaciones o cambios leves en el modelo. El procedimiento de optimización se basa en la búsqueda Tabu, explorando el espacio de soluciones y tratando de escapar de los óptimos locales.

- (b) **Análisis del comportamiento:** El comportamiento oficial del edificio se evalúa mediante la aplicación del método oficial de certificación (LIDER - CALENER) para el modelo simplificado de la construcción.
5. **Rediseño del edificio:** Si la certificación del modelo simplificado no es correcta o la solución encontrada no coincide con los deseos del usuario, puede rediseñar o volver a realizar un estudio con modificaciones del modelo de referencia inicial (de nuevo al paso 3).
6. **Definición final:** Si el modelo es correcto, concluye el estudio.

Este proceso, que el usuario puede configurar, puede dividirse conceptualmente en tres partes, de acuerdo con las aplicaciones. Como se muestra en la metodología expuesta en la figura 8.1, el sistema comprende:

- Un modelo de diseño que ofrece el modelo de referencia inicial (pasos 1, 2 y 3), y los posibles reajustes o modificaciones del modelo (paso 5).
- Un modelo de análisis de la eficiencia energética, que representa la herramienta o sistema experto, incluyendo un modelo simplificado (paso 4), un análisis de sensibilidad y estudio (paso 4.a), y finalmente un análisis de la conducta (paso 4.b).
- Una herramienta para la construcción del modelo de planificación, después de la decisión final que se alcanza por la aplicación del sistema.

El proceso de diseño, y el diseño indicado permite el desarrollo de un sistema informático, denominado a partir de ahora SEDICAE. A continuación, el capítulo presenta un caso de estudio realizado paso a paso, y la solución de 4 edificios de estudio en 12 situaciones climáticas diferentes aplicando la metodología del capítulo 8 mediante la herramienta SEDICAE.

En el apartado 9.1.1 se presenta un caso particular, en él se detalla un edificio concreto y se describe el proceso completo. En primer lugar, el modelo inicial se define, con el fin de calcular la demanda de energía anual y se detallan los parámetros del modelo hasta alcanzar una solución óptima para el algoritmo. En el apartado 9.1.2 se presentan los resultados de una batería de 48 problemas.

## 9. MEJORA EN LA EDIFICACIÓN SOSTENIBLE: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

### La zona climática y la orientación

El análisis de la zona climática debe ser el primer paso para cualquier edificio de bajo consumo o energía cero. Las zonas climáticas donde se encuentran los edificios actuales requieren información adicional sobre la severidad climática de invierno (SCI) y la severidad climática de verano (SCV) [Salmerón et al., 2013], y la influencia combinada de la temperatura exterior y la radiación solar. La escala utilizada depende del país de la Unión Europea. En el apartado 7.1.1 se presentó la escala española. En España, para establecer un criterio común para poder comparar los resultados, se adoptó como referencia la escala del CTE la cual distingue 12 zonas climáticas. Esta escala se divide en cinco zonas climáticas en invierno, designadas por letras de la A a la E, y para el verano cuatro zonas, designadas por los números 1 al 4. Cuando dos ubicaciones están en la misma zona climática, la demanda de energía para el invierno y el verano de dos edificios similares que se encuentran en los dos puntos geográficos distintos es similar. Para garantizar esta afirmación el CTE define las zonas climáticas como una función de la severidad climática que depende del número de grados-día y la radiación solar.

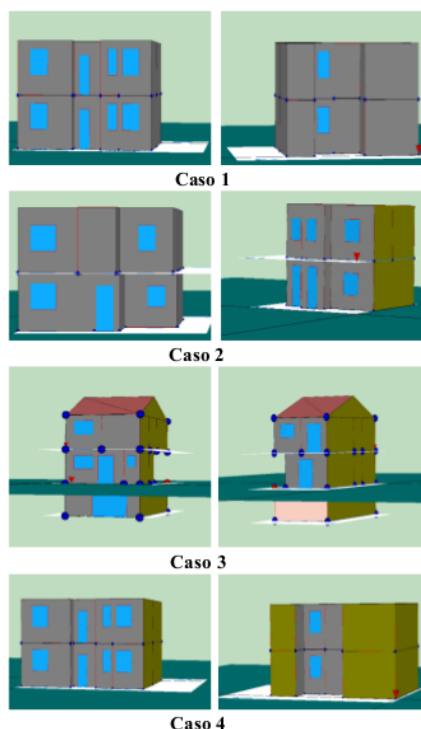
En este estudio, las condiciones climáticas representan ciudades como Madrid (D3), Barcelona (C2), Bilbao (C1), Valencia (B3), Málaga (A3) o Sevilla (B4). En la batería de pruebas (tabla 9.4) se utiliza los valores predeterminados que proporciona el software LIDER-CALENER.

Usando SEDICAE para cada tipo de edificio, nivel de zona climática y energía, se simularon cuatro orientaciones: Norte, Este, Oeste y Sur, pero la metodología es válida, al menos, en ocho orientaciones.

### Geometría

Los tipos de construcción utilizados por la herramienta para realizar las comparaciones empíricas son edificios residenciales típicos, como se muestra en la figura 7.4. Las propiedades estructurales básicas de los edificios, corresponden a edificios de referencia de la sección HE1 del CTE. La figura 9.3 describe cuatro edificios utilizados en el estudio.

Se seleccionaron cuatro tipos de edificios situados en la Península Ibérica: el caso 1 es una casa independiente aislada, el caso 2 es una casa adosada por un lado



**Figura 9.3:** Ejemplos de edificios residenciales.

(pareada), el caso 3 es una casa adosada en hilera y el caso 4 es una casa adosada en tres orientaciones. El diseño de estos ejemplos se genera a partir de los indicadores de calidad, y todos ellos cumplen los requisitos de eficiencia energética del CTE.

### 9.1.1 Caso detallado de un edificio

El edificio de estudio es utilizado para realizar un caso práctico detallado, se trata del ejemplo que aparece en el programa LIDER llamado “Ejemplo1.CTE”. Es un edificio situado en la “c/Feria, 7”, de la ciudad de Sevilla, que cuenta con un sótano, dos plantas y una cubierta a dos aguas (con un espacio no habitable bajo la cubierta). El edificio está orientado en la dirección N-S y el terreno presenta un desnivel de 2’65 m. entre la fachada principal (al Norte) y la posterior (al Sur).

Según indican los arquitectos Sofía García Fernández y Javier Serrano Pérez, la estructura del edificio muestra una vivienda cuya cimentación consiste en una losa armada de 50 cm. de espesor y un muro de contención en el desnivel del terreno, de

## 9. MEJORA EN LA EDIFICACIÓN SOSTENIBLE: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

hormigón armado de 30 cm. de espesor con trasdosado autoportante de cartón-yeso y aislante en la cámara.

La estructura se plantea compartida con las viviendas colindantes, de pilares (25x25 cm.) de hormigón, forjados unidireccionales de hormigón (25+5 cm.).

La cubierta consiste en un forjado horizontal de hormigón como los intermedios y faldones inclinados sobre tabiquillos con tejas. El espacio intermedio, no habitable, se aísla en su cara inferior con lana de roca. Las fachadas son de doble hoja, formadas por: enfoscado de mortero de cemento (1,5 cm.), ladrillo perforado (LP) de medio pie, embarrado (2 cm.), poliuretano proyectado (3 cm.), cámara de aire (2 cm.), tabique de ladrillo hueco sencillo (LHS) (5 cm.) y enlucido de yeso (1,5 cm.). Las ventanas son metálicas, con marco de 7 cm. de ancho y rotura de puente térmico, acristalamiento de vidrio simple y persiana.

La casa se encuentra en Sevilla, zona climática B4. La figura 9.4 muestra el plano de la casa unifamiliar y la tabla 9.1 muestra sus principales características. Como se puede observar, la vivienda unifamiliar consta de tres plantas: un sótano, una planta baja y un primer piso.

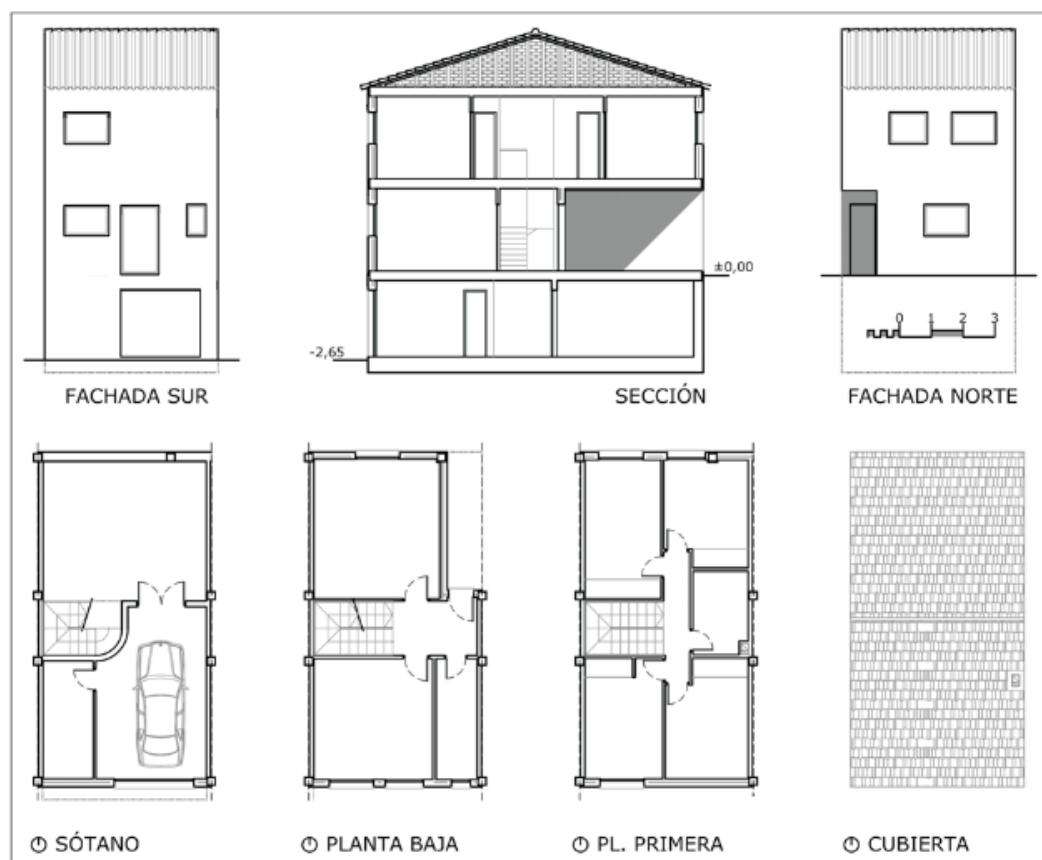
### 9.1.1.1 Propiedades geométricas

En la base de datos, se han identificado las características del material, para ayudar en la difícil tarea que tiene los diseñadores en su selección. En el nivel más básico, los diseñadores pueden utilizar las tablas de propiedades de los materiales disponibles. Sin embargo, estos datos son a menudo incompletos, y una vez publicados, son difíciles de actualizar.

El comportamiento final de los materiales depende de los procesos reales de construcción llevados a cabo por las diferentes empresas. Los datos utilizados para la estimación de los costes (coste unitario por metro cuadrado) se basan en datos históricos recogidos por un promedio de edificios de diferentes diseños y materiales. En este sistema, los costes y las listas de materiales seleccionados deben ser añadidos por los usuarios o empresas.

Para los caso presentados, la base de datos contiene diferentes valores de  $U$  respecto a la pared externa, techo y suelo, en un intervalo entre  $0.2 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$  y  $5,88 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$ , estos valores se emplean para analizar la demanda de calefacción y refrigeración de la vivienda residencial.





**Figura 9.4:** Plano de la vivienda unifamiliar.

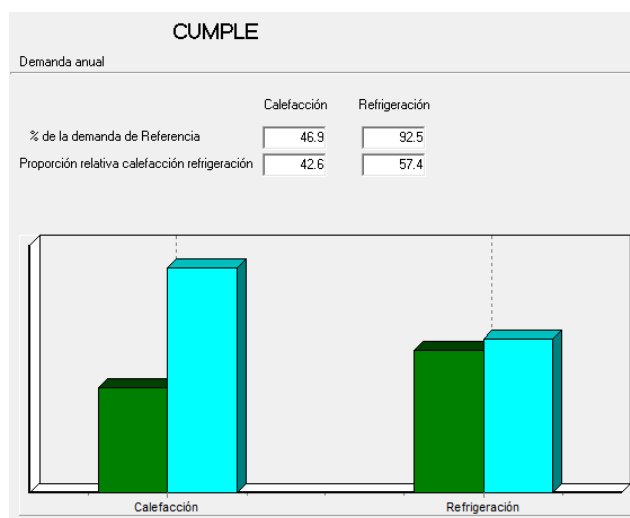
En las ventanas, los valores de  $U$  varían entre  $1,4\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  y  $5,6\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ . En la tabla 9.1 se muestra la transmitancia térmica de cada elemento y los valores de  $U$ . En las ventanas, se incluyen también el factor de la ventana solar, valor  $g$ , y la permeabilidad,  $p$ . En la tabla 9.1 se introduce los cambios producidos tras la simulación.

Los resultados de la simulación indican que con el aumento de los valores de  $U$  en la pared externa, las cargas de refrigeración disminuyen, mientras que aumenta la carga de calefacción. La misma conclusión se puede obtener por la ventana. Sin embargo, la solución es una mezcla de cambios que se puede atribuir a la zona climática. En la tabla 9.1, los valores de  $U$  disminuyen, excepto en el caso del suelo.

## 9. MEJORA EN LA EDIFICACIÓN SOSTENIBLE: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Tabla 9.1:** Propiedades geométricas.

Geometría		Inicial				Final			
		U	g	p	Precio	U	g	p	Precio
Muro	Norte	0.49	-	-	7.58	0.32	-	-	10.54
	Este	0.49	-	-	7.58	0.32	-	-	10.54
	Sur	0.49	-	-	7.58	0.32	-	-	10.54
	Oeste	-	-	-	-	-	-	-	-
Ventana	Norte	5.60	0.85	50.0	212	1.80	0.70	50.0	231
	Este	1.4	0.70	9.0	339	1.40	0.70	9.0	339
	Sur	3.3	0.75	50.0	220	1.80	0.70	50.0	231
	Oeste	-	-	-	-	-	-	-	-
Cubierta	-	0.57	-	-	4.93	0.23	-	-	9.34
Suelo	-	0.23	-	-	20.25	0.40	-	-	12.71



**Figura 9.5:** Resultado del edificio inicial presentado por el programa LIDER.

### 9.1.1.2 Situación inicial

En la figura 9.4 se presentó el edificio diseñado, en la tabla 9.1 las propiedades iniciales. Después de ejecutar el programa LIDER-CALENER, se obtuvo una solución positiva, lo que indica que el edificio cumple con el CTE. El edificio inicial necesita 46,9 % de la demanda de calefacción del edificio de referencia , y 92,5 % de la demanda de refrigeración como muestra la figura 9.5.

### 9.1.1.3 Proceso de evaluación

El objetivo se centra en la optimización del CCV de un edificio con el menor IEE, El apartado 8.9 aporta los conocimientos necesarios que permiten definir cualquier tipo de etiqueta para la certificación energética de edificios en España y sus ecuaciones. La información puede ser ampliada en [González et al., 2011]. La metodología presenta especial atención al uso del CCV, porque el CCV durante la vida útil de un activo es un buen indicador de la relación calidad ambiental-precio en los elementos de construcción. Esta metodología ofrece un análisis exhaustivo sobre el impacto ambiental y al mismo tiempo proporciona resultados cuantitativos, teniendo en cuenta los costes de la construcción durante un período de 30 años [European Commission and others, 2012]. Los cálculos necesarios se presentaron en detalle en las secciones del capítulo 8.

En el paso inicial del proceso, se seleccionan los elementos arquitectónicos tomados de la base de datos de materiales y precios. Tras calcular la demanda, se calcula la situación inicial que representa la construcción validada por el CTE, para la cual el sistema aplica equipos de refrigeración, calefacción y ACS de referencia en el programa LIDER - CALENER. A partir de las demandas de refrigeración y calefacción obtenidas, se calcula el consumo de energía primaria, final y las emisiones de  $CO_2$ , los resultados para la vivienda se muestran en la tabla 9.2.

A partir de los materiales seleccionados se realiza una estimación de la inversión y un cálculo del CCV, tabla 9.3. Después de la obtención de la solución inicial, el procedimiento aplica el algoritmo Tabu, buscando la optimización de la demanda, el consumo y la inversión con respecto a los datos geométricos y las posibles alternativas aplicables al problema, teniendo en cuenta la coyuntura actual, la tendencia es optimizar el CCV dada una calificación buscada, o la mejor calificación encontrada.

El análisis presenta la solución final: mínimo CCV para una calificación energética. El algoritmo Tabu toma como entrada el precio de cada elemento del diseño, la mejora proporcionada por los puentes térmicos, las estrategias de ventilación, el coste de las emisiones de  $CO_2$  y los precios de la energía. Mientras tanto, el rendimiento medio estacional de los sistemas puede suponerse constante y conocido. Esto permite al usuario obtener el consumo final de energía. La tabla 9.3 presentan los resultados de CCV en la solución inicial. En este trabajo se aplica una tasa

## 9. MEJORA EN LA EDIFICACIÓN SOSTENIBLE: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

**Tabla 9.2:** Resultados de calefacción y refrigeración.

	Inicial	Final
Demanda de calefacción ( $kWh/m^2$ )	16,92	5,73
Consumo de energía final de calefacción ( $kWh/m^2$ )	27,81	9,43
Consumo de energía primaria de calefacción ( $kWh/m^2$ )	28,09	9,52
Emisiones de $CO_2$ de calefacción ( $kg/m^2$ )	5,67	1,92
IEE de demanda de calefacción	0,61	0,21
IEE de emisiones de $CO_2$ de calefacción	0,64	0,22
Demanda de refrigeración ( $kWh/m^2$ )	12,89	14,62
Consumo de energía final de refrigeración ( $kWh/m^2$ )	6,55	7,43
Consumo de energía primaria de refrigeración ( $kWh/m^2$ )	17,11	19,40
Emisiones de $CO_2$ de refrigeración ( $kg/m^2$ )	4,25	4,82
IEE de demanda de refrigeración	0,39	0,44
IEE de emisiones de $CO_2$ de refrigeración	0,36	0,40

de descuento del 3 %. Para la Comisión Europea: “Los Estados miembros determinarán la tasa de descuento a utilizar en el cálculo macroeconómicos después de haber realizado un análisis de sensibilidad en por lo menos dos tipos diferentes, uno de los cuales será del 3 % en términos reales” [European Commission and others, 2012].

Después de la resolución con el algoritmo Tabu, el análisis presenta la solución final, tabla 9.3.

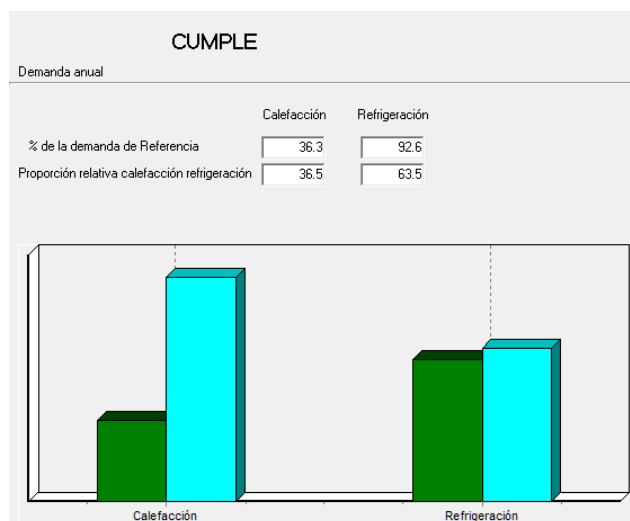
### 9.1.1.4 Situación Final

Después de ejecutar el programa LIDER-CALENER tras la aplicación del algoritmo Tabu, se obtuvo una solución positiva, lo que indica que el edificio cumple con el CTE, el edificio final necesita un 36,3 % de la demanda de calefacción del edificio de referencia, y un 92,6 % de la demanda de refrigeración como muestra la figura 9.6. La reducción de la calefacción en un 10,6 % y el aumento de la refrigeración en un 0,1 % respecto al resultado inicial (figura 9.6) supone un cambio en la proporción relativa, ya que la demanda de calefacción supone un 36,5 % de la demanda, y la de refrigeración supone el 63,5 %.

## 9.1 Mejora del proceso de diseño

**Tabla 9.3:** Resultados de la inversión y CCV.

	Inicial	Final
Estimación del coste del Ciclo de Vida €	21.103,67	18.916,61
Inversión Total €	7.020,22	6.671,31
Coste de Inversión €/m <sup>2</sup>	42,70	40,58
Precio Total €	7.020,22	6.671,31
Coste de inversión de los Muros €	479,76	662,23
Coste de inversión de las Ventanas €	4.307,42	4.598,06
Coste de inversión de las Cubiertas €	313,67	594,24
Coste de inversión de los Suelos €	1.294,20	816,78
Coste de inversión de los Puentes Térmicos €	625,17	0



**Figura 9.6:** Resultado del edificio final presentado por el programa LIDER.

### 9.1.1.5 Sistemas de climatización

Por último, tras validar el edificio y la solución final, se puede tomar una decisión sobre las características del sistema de climatización a elegir. El sistema desarrollado, en una versión posterior, muestra los resultados después de la aplicación de un sistema, el conjunto de posibles sistemas se muestran como una lista ordenada en función del CCV y la calificación energética, como se presenta en las figuras 9.7 y 9.8. Para los diferentes sistemas se obtienen soluciones con la misma calificación energética, pero con un CCV que pueden variar desde valores cercanos al inicial a

## 9. MEJORA EN LA EDIFICACIÓN SOSTENIBLE: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

valores cercanos a los costes de inversión.

Sistemas:							
Marca	Modelo	Energía	Consumo EP Calef...	Consumo EP Refrig...	Coste Ciclo de Vida	IEE de Emisiones d...	Calificación energét...
TOSHIBA	MONZA PLUS 10	Electricidad conven...	1,34	3,5	8.690,25	0,24	A
TOSHIBA	AVANT 10	Electricidad conven...	1,56	4,44	8.861,94	0,25	A
TOSHIBA	MONZA PLUS 13	Electricidad conven...	1,47	4,18	8.949,46	0,25	A
TOSHIBA	AVANT 13	Electricidad conven...	1,56	4,51	8.953,36	0,25	A
TOSHIBA	DAISEIKAI V 07	Electricidad conven...	1,01	2,6	9.104,69	0,23	A
TOSHIBA	DAISEIKAI V 10	Electricidad conven...	1,07	2,78	9.261,08	0,23	A

Figura 9.7: Comparativa de sistemas.

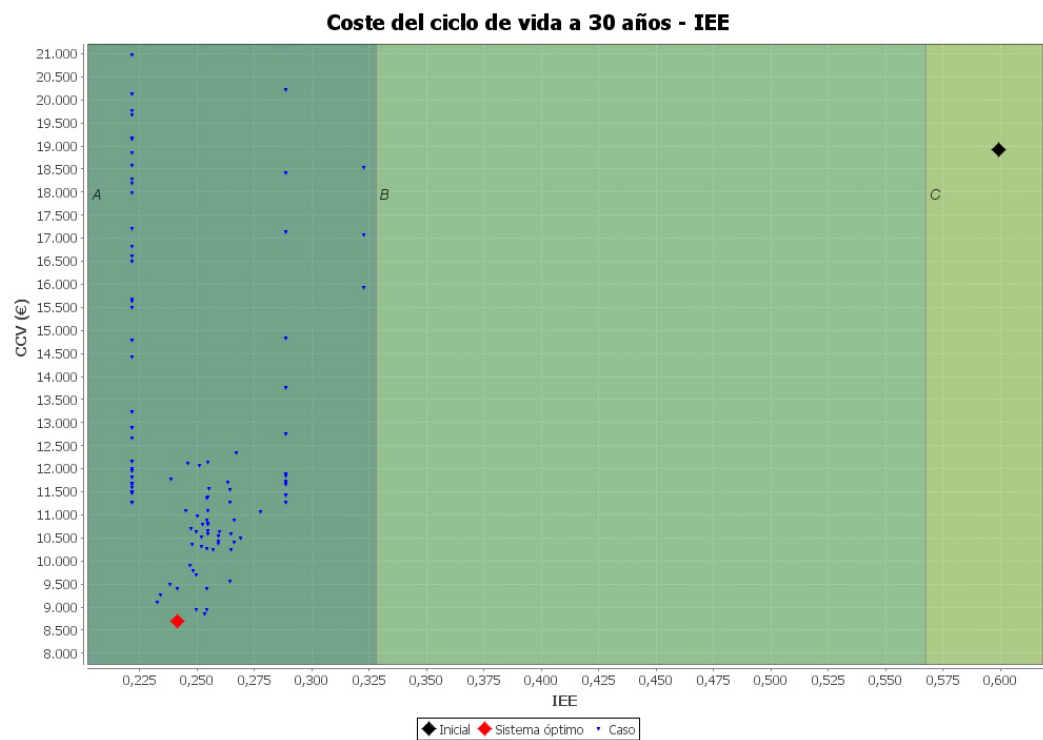


Figura 9.8: Gráfico de la optimización de sistemas.

### 9.1.1.6 Herramienta

En esta sección se describe la herramienta prototipo preliminar, llamada SEDI-CAE. En el anexo A se muestra la ventana principal de la herramienta y el proceso de ejecución. La herramienta fue desarrollada en Java 1.6.0 [Oracle, 2010] usando Eclipse IDE 3.6.2 [Free and open source software community, 2010] para implementar el algoritmo Tabu con el modelo simplificado, y para desarrollar la interfaz

## 9.1 Mejora del proceso de diseño

gráfica de usuario. La interfaz gráfica de usuario se compone principalmente de seis marcos: un marco inicial, un marco de optimización, un marco gráfico, un marco de informe comparativo, en una versión posterior se han incorporado una lista ordenada de los sistemas y otro marco gráfico.

El marco inicial se utiliza para introducir el fichero de entrada con el diseño del edificio y la definición de la zona climática. La salida consta de los parámetros que constituyen la construcción para su tratamiento por el modelo simplificado.

El marco de optimización, presente en la figura 9.9, presenta tres criterios diferentes para el análisis:

- Coste óptimo del ciclo de vida.
- Obtener una calificación energética (con un mínimo CCV)
- Consumo de calefacción

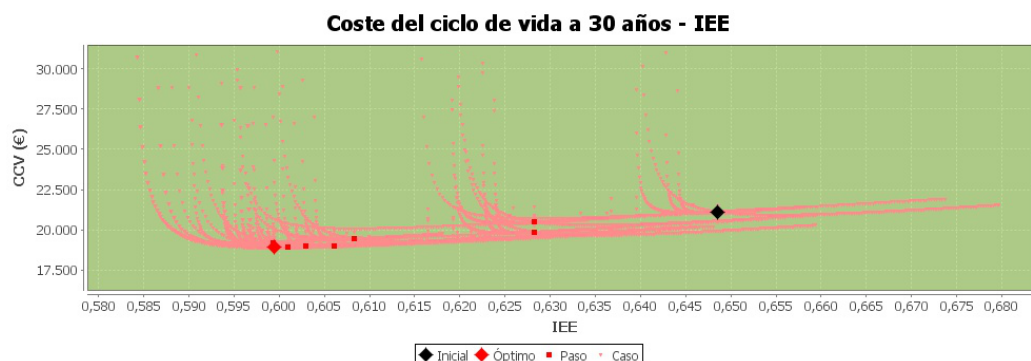
**Figura 9.9:** Optimizador.

El marco denominado gráfico, permite presentar la búsqueda de la solución al problema, el algoritmo presenta un conjunto de pasos, como se puede ver en la figura 9.10, el algoritmo recorre la frontera de Pareto hasta encontrar una solución óptima.

El informe comparativo se utiliza para mostrar la solución y facilitar la toma de decisiones acerca de los elementos y materiales, teniendo en cuenta las preferencias de los usuarios.

En una fase posterior se presenta una lista ordenada de los sistemas. En el Anexo C, se ha añadido el documento PDF que el sistema genera como resultado. La herramienta SEDICAE presentan una lista de sistemas ordenados por el mejor

## 9. MEJORA EN LA EDIFICACIÓN SOSTENIBLE: RESULTADOS Y DISCUSIÓN



**Figura 9.10:** Coste del ciclo de vida (30 años) - Índice de eficiencia energética.

IEE-CCV. En la figura 9.7 se observa como el sistema presenta la marca, modelo, tipo de energía, consumo primario de energía para la calefacción y la refrigeración.

Un último marco, presenta el gráfico de los sistemas. A la hora de encontrar la solución al problema, los sistemas muestran diferentes comportamientos, la gráfica 9.8 es un ejemplo.

### 9.1.2 48 escenarios

En este apartado, se presentan los resultados de una serie con 48 escenarios de prueba, todos los experimentos se realizaron en un Intel C2D E7400, 2.8 Ghz, 4 GB de RAM, con sistema operativo Windows 7.

La calidad de la aplicación, así como en otras aplicaciones, dependerá de la calidad del conjunto de datos. La mayor parte de los conocimientos y datos sobre el consumo de energía y la evaluación de las medidas de conservación de energía disponibles son para los edificios residenciales [Boyano et al., 2013], sin embargo, como destacó [Reilly et al., 2013], las principales lagunas de información incluyen datos suficientes y métodos robustos para identificar con precisión la energía y el ahorro de costes para determinadas combinaciones de tecnologías del hogar. Los datos necesarios para la consecución de este objetivo son importantes, no sólo son necesarios el histórico del combustible y los datos de consumo de electricidad necesarios. Sin embargo, la recopilación de datos es un proceso complejo y consume mucho tiempo.



La herramienta utiliza conjuntos de datos empíricos para sus evaluaciones comparativas. Los conjuntos de datos de la investigación fueron proporcionados por la empresa de construcción y de ingeniería DETEA, establecida en Andalucía (España). Sin embargo, las futuras versiones del sistema deberán contener otros conjuntos de datos relacionados con más materiales disponibles en el sector de la construcción española, con el fin de mejorar las capacidades de la herramienta. De hecho, con el fin de ayudar a implementar esta herramienta eficaz, los clientes y proveedores necesitarán de un mayor intercambio de información y una mayor cooperación desde el lado de la industria, para asegurar que todos los conjuntos de datos empíricos requeridos por los usuarios se cargan en la herramienta.

Tanto el programa oficial (LIDER-CALENER) como esta herramienta deben ser alimentados con los mismos datos. Al mismo tiempo, es importante saber el precio de los materiales utilizados para el cálculo del CCV de los edificios. La base de datos SEDICAE contiene información de los precios de los elementos comunes a ambas aplicaciones.

El diseño de estos ejemplos se genera a partir de los indicadores de calidad, y todos ellos cumplen los requisitos de eficiencia energética de los edificios en España (CTE). Sin embargo, también se pueden utilizar para demostrar que los diseños se pueden mejorar a menor CCV.

La tabla 9.4 muestra la evaluación inicial de los ejemplos, así como el resultado de la aplicación de criterios de optimización para reducir al mínimo el CCV y para reducir al mínimo la calificación de la energía con un valor del CCV no mayor que el inicial. Los escenarios están hechos para cuatro tipos diferentes de casas, casos 1, 2, 3 y 4 de acuerdo con la figura 9.3. El edificio del caso 1 tiene el área de transferencia más grande en el área por planta y por ello debe tener la mayor pérdida de transmisión (primera parte de la fórmula 8.1). Para las pérdidas por ventilación, también debe ser más grande para el edificio del caso 1 debido a que existen más fugas, pero con una diferencia insignificante. Como el volumen por área de suelo son aproximadamente similares para los casos 1 al 4, en las doce zonas climáticas, para el caso 1 se utiliza más energía, y el caso 2, con una mayor disminución que a través de los casos 3 y 4. En las zonas con veranos suaves: C1, D1 y E1, la demanda de refrigeración es cero. La reducción de la demanda de calefacción es alrededor del 45 % para el caso 1, y se reduce al 35 % en el caso 2. En algunos casos hay un

## 9. MEJORA EN LA EDIFICACIÓN SOSTENIBLE: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

aumento en la demanda de refrigeración. La calificación energética se mantienen o se reducen, y los costes del ciclo de vida se reducen en todos los casos cerca del 15 %.

Con respecto a su coste computacional, la ejecución de un ejemplo con el programa oficial, LIDER, requiere un tiempo de 40 segundos para un edificio de dos plantas o, por ejemplo, 2 minutos y 40 segundos en un edificio de 4 plantas para una sola ejecución. El sistema experto realiza una amplia variedad de ejemplos, y con el modelo simplificado, el tiempo medio de resolución requerida por el algoritmo es menor de un minuto. La resolución de tiempo depende del tamaño de las bases de datos con los materiales y los precios que están disponibles para el análisis.

Por último, se debe señalar que el modelo simplificado es un modelo conservador, por lo que se puede garantizar que la calificación energética de los edificios será al menos la indicada en el gráfico. Sin embargo, en la segunda fase, tras pasar por el motor de cálculo del LIDER, el programa muestra en muchos casos calificaciones menores. La tabla 9.4 presenta los valores oficiales proporcionados por el software LIDER.

**Tabla 9.4:** Ejemplo de resultados en edificios residenciales en las zonas climáticas españolas.

Caso	ZC	DC <sub>i</sub>	DC <sub>f</sub>	DR <sub>i</sub>	DR <sub>f</sub>	CCV <sub>i</sub>	CCV <sub>f</sub>	CE <sub>i</sub>	CE <sub>f</sub>
1	A3	21.4	11.1	18.8	13.02	22,654.6	18,634.9	D	C
1	A4	24.9	12.5	25.21	17.82	25,818.5	21,259.4	D	C
1	B3	48.7	20.8	13.62	13.61	35,497.0	28,751.5	D	C
1	B4	37.4	19.3	31.19	22.13	33,533.5	27,935.2	D	C
1	C1	98.3	56.9	0	0	58,330.4	48,697.8	E	D
1	C2	70.9	32.2	7.07	7.76	45,538.3	36,860.6	D	C
1	C3	85.3	41.7	14.13	12.21	54,506.3	44,585.1	D	C
1	C4	87.8	49.2	24.69	14.28	58,203.4	48,451.7	D	C
1	D1	150.9	88.3	0	0	85,700.7	71,761.6	E	D
1	D2	130.3	72.2	4.27	4.44	75,869.7	63,009.3	E	D
1	D3	104.5	54.8	11.22	11.44	63,954.7	53,137.0	E	D
1	E1	178.3	104.1	0	0	99,958.7	83,698.6	E	D
2	A3	25.4	12.3	20.02	13.09	18,693.1	15,442.9	D	C
2	A4	28.1	13.7	25.89	17.81	20,769.6	17,025.6	D	C
2	B3	53.1	25.8	13.64	20.46	28,603.4	23,840.6	D	D
2	B4	42.1	21.8	31.27	21.13	27,174.5	22,624.3	D	C

## 9.1 Mejora del proceso de diseño

2	C1	96.2	52.0	0	0	43,688.7	36,807.9	E	C
2	C2	74.5	38.9	6.95	12.83	36,055.1	30,178.2	D	D
2	C3	89.4	50.1	13.6	19.29	43,051.7	35,887.2	E	D
2	C4	90.5	48.9	24.66	14.68	45,472.7	38,044.1	D	C
2	D1	148.6	81.8	0	0	64,691.5	54,679.0	E	C
2	D2	130.7	77.4	4.38	8.11	58,165.1	49,046.9	E	D
2	D3	105.5	57.0	11.64	7.39	49,264.8	41,595.6	E	C
2	E1	174.9	96.0	0	0	75,215.8	63,599.6	E	C
3	A3	8.5	6.0	6.02	3.09	14,000.4	10,134.9	C	B
3	A4	10.3	6.7	9.53	7.51	16,191.6	12,104.3	C	B
3	B3	23.4	16.5	4.63	2.41	23,341.0	19,069.3	C	C
3	B4	17.3	12.7	12.49	8.98	21,545.4	17,201.9	C	B
3	C1	48.4	34.4	0	0	38,878.8	33,308.3	C	C
3	C2	35.0	25.0	1.89	0.21	30,310.6	25,509.5	C	B
3	C3	43.8	32.3	3.45	0.55	36,550.7	31,230.7	C	C
3	C4	44.1	32.6	8.23	6.41	38,193.5	32,504.0	C	C
3	D1	79.3	57.9	0	0	59,388.3	52,086.3	C	C
3	D2	68.8	50.5	0.71	0	52,492.9	45,786.7	C	C
3	D3	53.7	38.8	3.35	0.81	43,158.3	37,308.1	C	C
3	E1	94.8	69.3	0	0	69,798.7	61,520.8	C	C
4	A3	15.9	11.1	14.35	7.97	17,457.1	14,433.0	D	C
4	A4	17.4	12.4	19.33	11.69	19,348.7	16,098.2	D	C
4	B3	36.4	24.2	9.72	4.87	27,317.1	23,494.2	D	C
4	B4	28.2	19.1	23.39	14.19	25,930.1	22,148.5	D	C
4	C1	67.8	43.4	0	0	41,998.4	36,934.5	D	C
4	C2	51.0	33.9	4.13	1.28	33,902.3	29,550.0	D	C
4	C3	62.2	41.5	9.82	4.28	41,119.3	35,882.7	D	C
4	C4	63.2	41.2	17.36	9.89	43,294.1	37,767.1	D	C
4	D1	106.0	68.3	0	0	62,367.2	55,300.6	D	C
4	D2	92.6	60.4	2.46	0.41	55,777.7	49,193.9	D	C
4	D3	73.7	48.3	8.21	4	46,926.0	41,305.2	D	C
4	E1	125.2	80.1	0	0	72,615.7	64,517.0	D	C

Caso: Tipo de edificio, ver figura 9.3.

ZC: Zona climática

DC: Demanda de calefacción en  $kWh/m^2$  año, para la situación inicial ( $i$ ) y configuración final ( $f$ ).

DR: Demanda de refrigeración en  $kWh/m^2$  año, para la situación inicial ( $i$ ) y configuración final ( $f$ ).

CCV: Coste del ciclo de vida en €, para la situación inicial ( $i$ ) y

## 9. MEJORA EN LA EDIFICACIÓN SOSTENIBLE: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

configuración final ( $f$ ).

CE: Calificación energética del edificio, para la situación inicial ( $i$ ) y configuración final ( $f$ ).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, influenciados por la zona climática de estudio del edificio, se observa que es necesaria y eficaz la aplicación de los cálculos simplificados y la heurística para obtener resultados eficientes, tanto en el coste del ciclo de vida del edificio, como en la demanda de estos. Como contrapartida a la eficiencia, y al ahorro en el ciclo de vida del edificio, la inversión inicial del edificio aumenta, en nuestro ejemplo tipo, en un 25 %, en el total de la inversión de los elementos que conforman la envolvente del edificio. Sin embargo, el efecto estimado sobre el coste del ciclo de vida en este ejemplo es de un ahorro del 20 %. Para esta vivienda, cada euro invertido en la mejora del edificio, supone un ahorro de cuatro euros en el coste del ciclo de vida.

La optimización de la envolvente del edificio permite una importante mejora de la eficiencia, sin embargo, sería de interés la ampliación del proceso para la inclusión de los sistemas de agua caliente sanitaria o la integración al algoritmo tabú de los sistemas de calefacción y refrigeración, que actualmente pueden ser definidos previamente en el programa LIDER. Así, existiría una base de datos donde el usuario tendría la posibilidad de elegir entre varios tipos de sistemas como por ejemplo calderas de biomasa, eléctricas, etc. Para cada tipo de sistema podrá seleccionar varios niveles de potencia, rendimientos medios y precios. Esta mejora, determinaría, de entre todas las opciones especificadas por el usuario, aquella que mejor optimice los resultados respecto a la calificación energética con menor CCV.

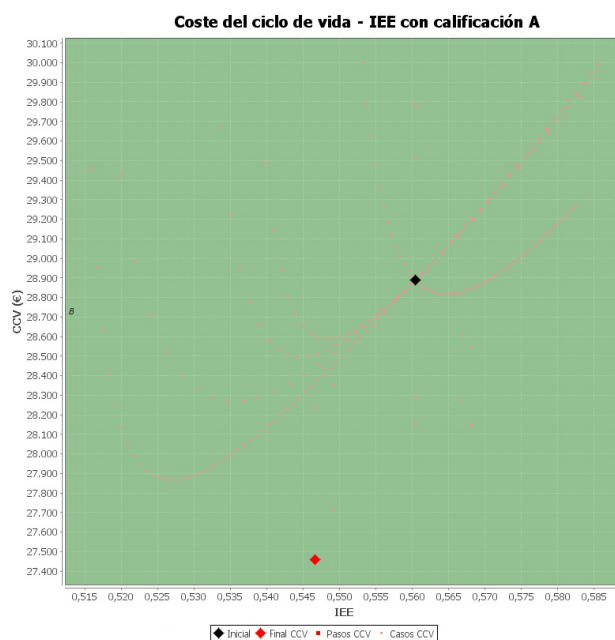
En [Attia et al., 2013] se presentan las necesidades de integración de las herramientas de optimización del rendimiento en el diseño de edificios de energía neta cero. Los resultados indican un avance en el uso de algoritmos evolutivos en la resolución de problemas de optimización. Attia et al. aplican el algoritmo genético para resolver problemas de diseño y de operación. Ciertamente, los algoritmos evolutivos también son capaces de adaptarse y resolver un problema de optimización particular, con eficacia. Sin embargo, las limitaciones existentes respecto a la dificultad de uso, curva de aprendizaje, el modelo de incertidumbre o incluso el tiempo

de cálculo, acentúan la elección del uso de la búsqueda tabú en el desarrollo de esta metodología.

### 9.1.3 La inversión

Los intereses de constructores y de compradores están a veces contrapuestos en el sector de la construcción. Los constructores, pretenden construir siempre con la menor inversión para incrementar el margen de beneficio. Sin embargo, a los compradores les interesa estudiar el CCV, pues una inversión inicial superior al inicio puede ser rentable a lo largo de la vida útil del edificio.

En este apartado, se pretende demostrar que esta idea, es errónea. Como se puede observar en la figura 9.11 y 9.13, se presenta la minimización del CCV, y de forma paralela, en las figuras 9.12 y 9.14 se presentan los mismos datos para la inversión frente al IEE, como se puede observar, las curvas de CCV tienen forma de U, con mínimo del CCV en la base de la U, sin embargo, la inversión aumenta a menor IEE, pero como se puede observar en la figura 9.12, minimizar el CCV no supone un aumento desmesurado de la inversión. En la figura 9.14, el valor de inversión inicial es muy cercano al valor del óptimo CCV.



**Figura 9.11:** Ejemplo de iteración CCV frente a IEE.

## 9. MEJORA EN LA EDIFICACIÓN SOSTENIBLE: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

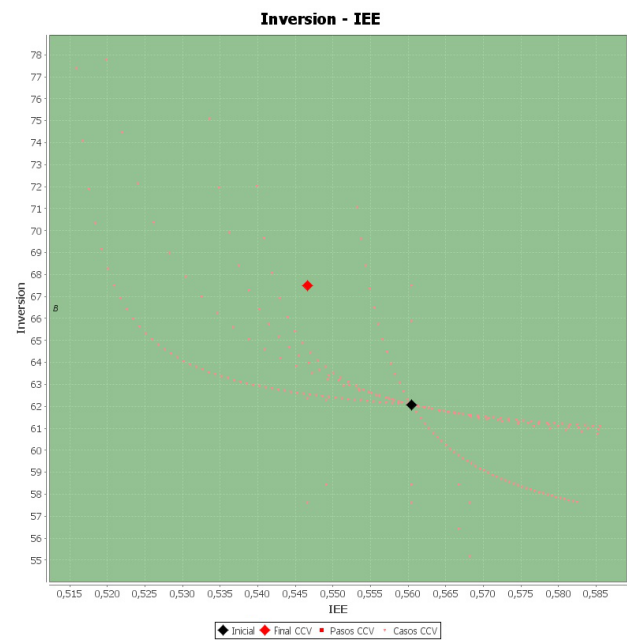


Figura 9.12: Ejemplo de iteración inversión frente a IEE.

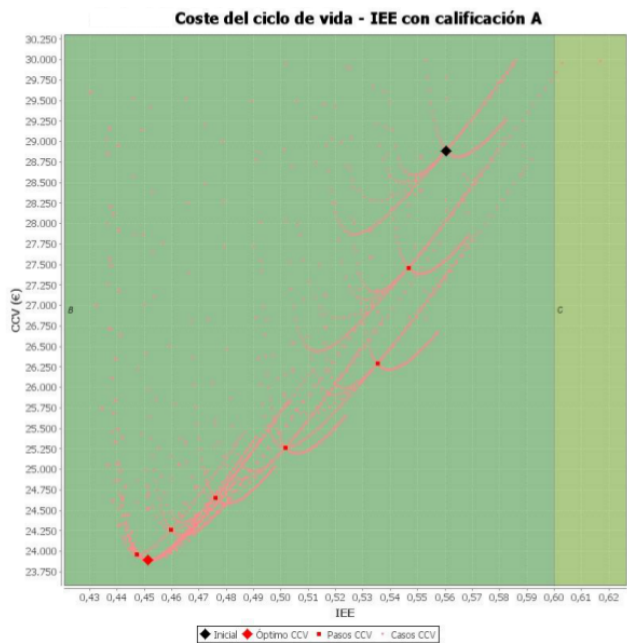
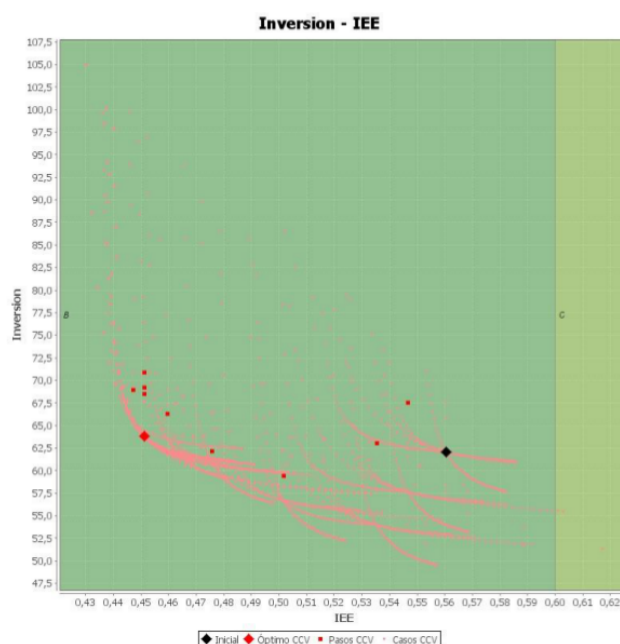


Figura 9.13: Ejemplo de CCV frente a IEE.



**Figura 9.14:** Ejemplo de inversión frente a IEE.

## 9.2 Conclusiones

En el capítulo se describe un sistema experto como herramienta para ayudar en la toma de decisiones respecto a la elección de los materiales de construcción. El sistema aplica una metodología basada en la búsqueda tabú para la optimización del diseño de edificios. La aplicación de esta metodología en cuatro viviendas unifamiliares, con cálculos realizados para 12 zonas climáticas, ha mostrado resultados satisfactorios. Los elementos elegidos para los edificios ha supuesto una mejora en el coste del ciclo de vida de los edificios, su calificación energética, y en las emisiones de  $CO_2$ . La metodología propuesta también reduce los requisitos de tiempo de desarrollo en el diseño de edificios, al permitir al usuario seleccionar fácilmente los materiales de construcción que mejoran la calidad de los edificios con un coste del ciclo de vida inferior. Además, el ahorro económico y energético que resulta de la aplicación de esta metodología no sólo representa una ayuda importante para los arquitectos y urbanistas, sino también un paso significativo en el sector de la construcción para alcanzar el objetivo de ahorro en la UE, a un 20 % reducción del consumo de energía para el año 2020. Finalmente, se ha demostrado que los costes

## **9. MEJORA EN LA EDIFICACIÓN SOSTENIBLE: RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

---

de inversión inicial no son significativos frente a la mejora energética.



*No hay enigmas, si un problema  
puede plantearse, es que puede re-  
solverse*

Ludwig Wittgenstein

## CAPITULO 10

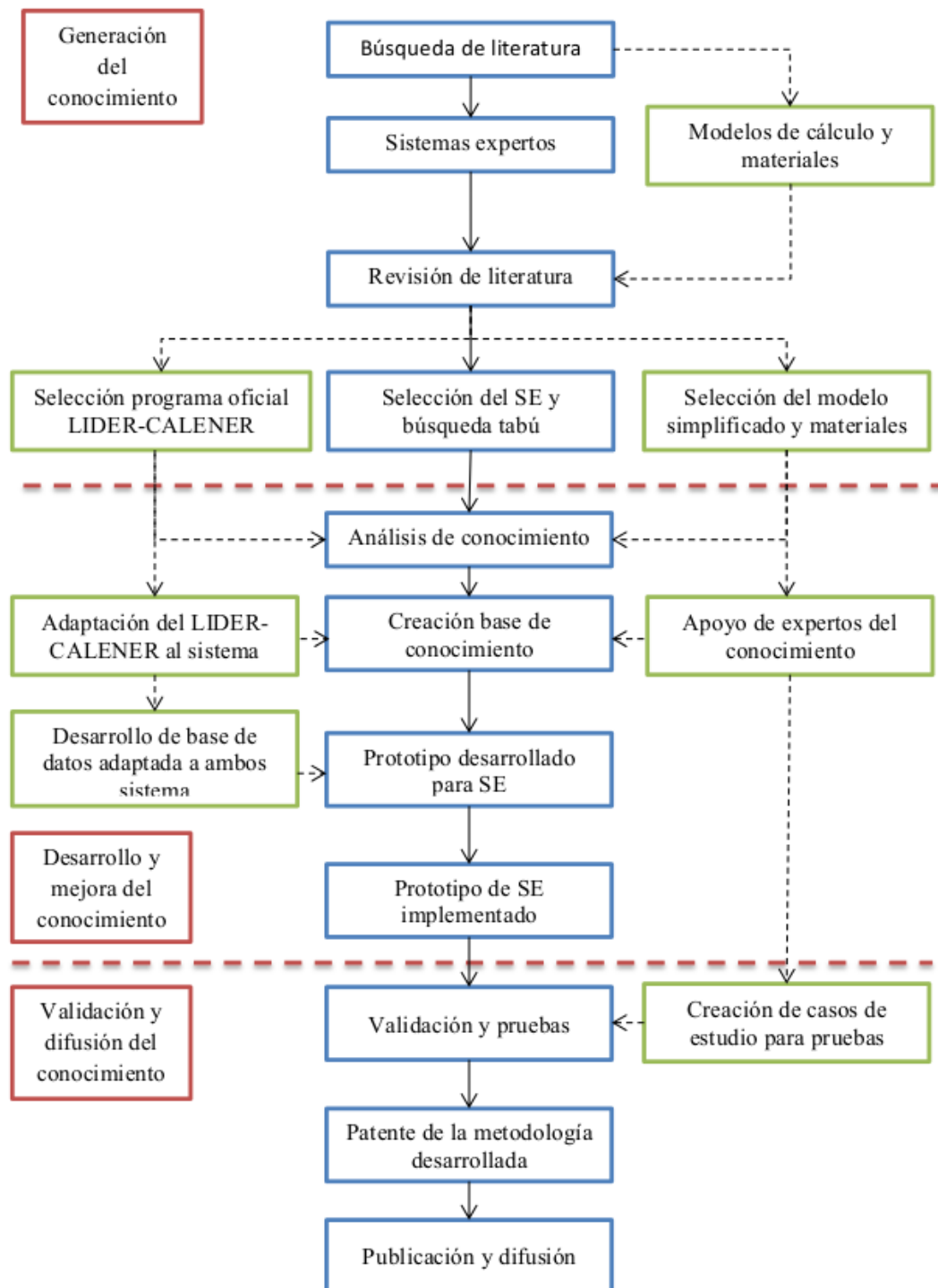
# Conclusiones de interés para la tesis

El efecto sobre el consumo energético del sector residencial en España, que actualmente es de 35.3 GJ/Hogar en calefacción, en viviendas unifamiliares, podría verse considerablemente reducido mediante la aplicación de diseños optimizados, reduciéndose considerablemente la diferencia de consumo respecto a las residencias de bloque. Las mejoras energéticas son considerables, las reducciones en los costes del ciclo de vida son un aliciente para los propietarios que verán recompensado el aumento en el coste inicial de sus edificios, tanto económicamente como en el confort de sus viviendas.

En este estudio, se han presentado las soluciones óptimas de los edificios, que muestran mejoras notables tanto para el óptimo CCV como para la demanda. Las conclusiones respecto a la metodología o los resultados han sido presentadas en los capítulos anteriores. El proceso seguido en la investigación puede ser resumido con la figura 10.1

Respecto al marco regulatorio (CTE) y las certificaciones energéticas (CALENER) propuestas en España, llama la atención que no se emplea el indicador de eficiencia energética, sino indicadores cualitativos que reflejan el consumo relativo del edificio analizado respecto a un edificio de referencia. En estos no se indican los

## 10. CONCLUSIONES DE INTERÉS PARA LA TESIS



**Figura 10.1:** Esquema del proceso de investigación.

---

consumos cuantitativos (medidos en  $\frac{kW \cdot h}{m^2}$  año) de los edificios, ni del de referencia, ni los límites permitidos por la norma. El programa solo refleja el porcentaje de la demanda de referencia en calefacción o refrigeración, y la proporción relativa. Y se indica si cumple o no, incluso se puede observar una gráfica, pero no se pueden comparar en datos ambos edificios. Sin embargo, el sistema desarrollado permite mostrar una comparativa de la mejora del edificio real. Gracias a este modelo simplificado combinado con la búsqueda tabu, y a los resultados de este proyecto, de forma automática ambos edificios estarían caracterizados cuantitativamente desde el punto de vista económico y energético, de forma que los diseñadores o usuarios pueden tener cuantificadas las repercusiones económicas del ahorro económico y consumo energético de sus edificios, de forma que las soluciones favorezcan a la mejora en la sostenibilidad de los proyectos.

El reto es conseguir construir edificios que sin sobrecostes, se conviertan en sostenibles.



# **Bloque III**

## **Climatización y confort**



*No tendremos mejores condiciones  
en el futuro si se está satisfecho con  
todo aquello que tenemos en la ac-  
tualidad*

Thomas Edison

# CAPITULO 11

## Confort termal

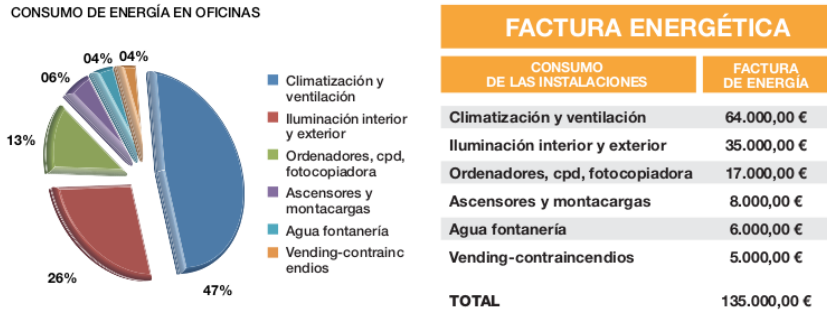
En el bloque I se presenta el estado actual del término SE, sus metodologías y técnicas. En el bloque II, se desarrolla e implementa una metodología para definir la envolvente del edificio que demande menor consumo energético en los sistemas de climatización. En este bloque desarrolla una metodología con la cual obtener el mayor confort de los ocupantes de un edificio, sin olvidar el consumo energético.

### 11.1 Introducción

El consumo de energía de los edificios depende significativamente de los elementos aplicados para asegurar el ambiente interior. La temperatura, humedad, ventilación e iluminación son factores que afectan junto al diseño y funcionamiento del edificio. Igualmente, el confort termal o ambiente interior también afecta a la salud, productividad y bienestar de los ocupantes. El coste de la mala calidad de un ambiente interior, es superior en términos económicos en las prestaciones laborales o en la calidad de vida, que en el propio consumo energético. Además, si los ocupantes están incómodos es probable que realicen acciones para mejorar su confort, y por lo general, estas acciones tienen implicaciones económicas. En la figura 11.1 se presentan los resultados de un ejemplo de estimación del consumo y costes de

## 11. CONFORT TERMAL

una oficina, donde como se puede observar el 47 % del consumo hace referencia a la climatización.



**Figura 11.1:** Edificio oficinas tipo de 5.000 m<sup>2</sup> (Asociación3E).

La alta demanda y consumo energético que supone la climatización es la principal motivación para estudiar el confort en edificios y sus efectos. Así en este capítulo se revisan las distintas metodologías de estudio, y algunas de las normas nacionales, internacionales e informes técnicos. El objetivo de este bloque es desarrollar una metodología basada en el confort de los usuarios, con la cual tomar decisiones en un sistema de climatización reduciendo el consumo cuando éste no es necesario.

### 11.1.1 Argumentos para mejorar el confort termal de los edificios

Las personas se adaptan a los estados de confort con los que conviven de forma rutinaria. Por esta razón, es necesario conocer cuál es el nivel de confort esperado por los usuarios en diversas situaciones. Teniendo en cuenta que el entorno varía día a día, y temporada a temporada, es necesario desarrollar técnicas que permitan conocer las relaciones existentes entre la temperatura u otros valores ambientales y el confort.

### 11.1.2 La satisfacción de los usuarios

En 1990, realizando encuestas de satisfacción a los usuarios de edificios con sistemas solares pasivos (muros y techos de acumulación solar), [Griffiths, 1990] ob-



servó que tener la temperatura adecuada “fue una de las características que la gente consideraba más importante de un edificio”. Además, la frescura del edificio fue un requisito importante mencionado por los encuestados para su estudio. [Croome et al., 1994] observaron que la sensación subjetiva de la frescura del aire está estrechamente relacionada con la temperatura del aire.

La insatisfacción con el ambiente térmico está muy extendida, incluso en edificios con controles sofisticados se dan habitualmente estos casos. Son muy comunes las quejas orientadas a las sensaciones de calor en invierno y de frío en verano en los edificios con aire acondicionado y calefacción.

El descontento provoca que los usuarios busquen por su cuenta las maneras de encontrar el confort, mediante su propio calentador eléctrico, ventilador o refrigeración. Estas acciones correctoras que aplican los usuarios generan un aumento en el consumo de energía.

### 11.1.3 El consumo de energía

La temperatura interior para un edificio es un factor importante, las decisiones tomadas respecto a este factor afectan a la energía utilizada por el edificio. La pérdida o ganancia de calor de un edificio es proporcional a la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior. El consumo que realizan los edificios en climatización es un área crítica. En primer lugar, los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, *Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) utilizan electricidad, que es generalmente muy ineficiente en su generación, y en consecuencia se desperdicia una gran cantidad de energía. En segundo lugar, son cuantiosos los problemas que motivan la necesidad de usar sistemas de HVAC que pueden ser resueltos simplemente mediante el aumento del rendimiento térmico de la envolvente del edificio. En el bloque II, se observó el efecto del diseño del edificio en la demanda y consumo de un edificio. Uno de los métodos utilizados para evaluar las necesidades de los edificios es encontrar, a partir de datos meteorológicos, el número de grados-día en cada temporada (calefacción y refrigeración). Esto se calcula multiplicando los días durante los cuales hay un descenso de la temperatura interior y exterior por el número de grados del descenso de la temperatura para ca-

## 11. CONFORT TERMAL

---

da día. Si por ejemplo se produce una disminución en la diferencia de temperatura exterior-interior disminuirá la carga de climatización.

### 11.2 Los dos modelos o escuelas

Ante el problema del confort termal, surge una gran pregunta:

**“¿Cómo podemos definir un ambiente térmico comfortable?”**

Las respuestas a esta pregunta están relacionadas con la manera en que los edificios son diseñados y con su posterior vida útil. Definir el confort difiere del entorno de trabajo, cuando se trabaja con edificios acondicionados permanentemente, sea cual fuere el tipo de clima y las características culturales del contexto, la situación es diferente a cuando se trabaja con edificios no acondicionados permanentemente, que permiten a los ocupantes sentirse en bienestar y conectados a su clima y cultura. La pregunta que surge es si los ocupantes de estos diferentes tipos de edificios definirían el confort de la misma manera.

Sin embargo, en el campo de la investigación, como de las normativas referidas a confort térmico, se presentan dos escuelas: las basadas en los modelos “adaptativos” y las basadas en los modelos “estáticos”, cada uno de ellos con diferentes bases metodológicas, enfoques y prescripciones sobre cómo debería ser manejado el clima interior de un edificio. Ambos modelos, tienen diversas implicaciones sobre el diseño, los medios de control del ambiente térmico y la cantidad de energía a consumir para lograr un ambiente térmico comfortable.

Los modelos estáticos dieron como resultado estándares que han sido aplicados universalmente para todo tipo de edificios y poblaciones y, se caracterizan por su mínimo reconocimiento del clima exterior y del contexto, por lo que han contribuido a incrementar la dependencia del acondicionamiento mecánico, especialmente la refrigeración. Estos estándares (ISO 7730/1994 [ISO 7730, 1994], ANSI/ASHRAE Standard 55/2004 [ASHRAE, 2004]) prescriben condiciones “ideales” para el confort térmico que están basados en el modelo de balance de calor del cuerpo humano y derivados de experimentos de laboratorio en cámaras climáticas.

El debate surge cuando no existe acondicionamiento mecánico permanente. En este caso, se debe comprender y tener en cuenta los aspectos sociales y culturales

### **11.3 Elementos que afectan en el proceso de confort termal**

---

del confort, incluyendo la variación que se da entre las personas en relación con la necesidad o deseo de aire acondicionado. Esto implica cambiar el modo de ver la relación entre las personas y su ambiente térmico.

Una visión alternativa pretende realzar el papel que juegan las personas, no solo como variables del problema, sino como alimentadores del conocimiento que surge de las propias preferencias térmicas a través de la manera en que interactúan con el ambiente, y mediante la modificación de su propio comportamiento o mediante la adaptación gradual de las expectativas del usuario ante un ambiente térmico. Esta alternativa, pretende tener en cuenta a las personas mediante la realización dinámica de encuestas realizadas en condiciones reales de uso del edificio, un estudio dinámico en términos del ambiente térmico y de las actividades de sus ocupantes.

Los modelos adaptativos recomiendan estándares de temperatura interior variable. Estos modelos, toman en consideración las capacidades de adaptación y preferencias de los ocupantes. Para así poder controlar la temperatura de forma responsable con el ambiente, mejorando los niveles de confort de los ocupantes, reduciendo los consumos de energía y asociando las variables al clima.

### **11.3 Elementos que afectan en el proceso de confort termal**

Aun mejorando la envolvente del edificio, la interacción térmica entre el hombre y el medio ambiente es muy compleja y ha sido objeto de una gran cantidad de estudios. Los procesos internos de cómo producimos y respondemos al calor han sido estudiados por los fisiólogos, nuestros sentimientos conscientes sobre el medio ambiente por los psicólogos y los procesos de transferencia de calor entre el hombre y el medio ambiente por los físicos. Además, hay factores sociales que determinan la forma en que reaccionamos ante el medio ambiente que es el ámbito de las ciencias sociales, sin embargo, es en el papel del medio ambiente donde los ingenieros deciden cómo nuestras necesidades pueden ser satisfechas en los edificios. Finalmente, se debe subrayar que el estudio del confort térmico tiene que tener todas estas consideraciones en cuenta.

## 11. CONFORT TERMAL

---

Desde el punto de vista de la fisiología, los seres humanos producen energía a partir de los alimentos y la mayor parte de esta energía toma la forma de calor. Este “calor metabólico” es producido por el cuerpo todo el tiempo, aunque se produce más calor cuando estamos activos. Por tanto, los humanos más activos son los que producen más calor. La actividad muscular se asocia particularmente con el calor producido, aunque todas las funciones corporales producen algo de calor. El calor es transportado alrededor del cuerpo por la sangre. Para equilibrar la entrada metabólica, el calor es continuamente perdido hacia el medio ambiente a través de la piel y a través de las superficies de los pulmones. Para el buen funcionamiento de los órganos del cuerpo, la temperatura de éstos se debe mantener constante. Ante cualquier situación de estrés térmico, el cuerpo va a reaccionar fisiológicamente para restablecer el equilibrio térmico. Por ejemplo, si la temperatura del cuerpo disminuye, el cerebro inicia una acción de vasoconstricción, reducción de los vasos sanguíneos. La circulación de la sangre se reduce, reduciendo de este modo el suministro de calor y causando que caiga la temperatura de la piel. Esto reduce la pérdida de calor.

Aunque los fisiólogos se han preocupado por los límites de la resistencia humana ante el calor o el frío, en el caso de los edificios, la comunidad científica encuentra especial interés en la fisiología del estrés térmico.

Desde el punto de vista de la psicología y de la física, existen acciones termorreguladoras del cuerpo que son inconscientes y son aumentadas por el cerebro debido al sentido térmico que existe en la piel. La sensación de calor o frío en el medio ambiente surge en parte de los sensores de la piel. Junto al estrés térmico debido a la temperatura corporal, la sensación de temperatura puede ser agradable o desagradable dependiendo de si el efecto que genera el ambiente está o no en el sentido del equilibrio del cuerpo. Así, una sensación de frío será agradable cuando el cuerpo se sobrecalienta, o desagradable si ya está frío. Al mismo tiempo, la temperatura de la piel no es uniforme. Por lo tanto, un área del cuerpo puede modificar la sensación y valoración que se tiene de ambiente en su conjunto. El uso de ropa también tiene un marcado efecto sobre el nivel y la distribución de la temperatura de la piel, como se podría esperar. Y debe ser contemplada como variable en el estudio del confort. Así pues, la sensación producida por un estímulo térmico depende de condiciones fisiológicas, por lo que nuestra sensación térmica

### **11.3 Elementos que afectan en el proceso de confort termal**

---

no sólo es fisiología, sino que también depende de las condiciones sociales y de otro tipo de condicionantes. Por lo tanto no se puede decir que, dado un conjunto de condiciones, estas darán lugar a una sensación, sólo se puede decir que hay una probabilidad de que la sensación será de dicha manera.

Desde el punto de vista físico, el ser humano es un cuerpo caliente con superficie variable que principalmente transfiere calor al medio ambiente a través de cuatro vías: la conducción, la convección, la radiación y la evaporación.

#### **Conducción**

La conducción es el fenómeno basado en la propagación de calor entre dos cuerpos o partes de un mismo cuerpo a diferente temperatura debido a la agitación térmica de las moléculas, no existiendo un desplazamiento real de estas.

#### **Convección**

La convección es la transmisión de calor por movimiento real de las moléculas de una sustancia. Este fenómeno sólo podrá producirse en fluidos en los que por movimiento natural (diferencia de densidades) o circulación forzada (con la ayuda de ventiladores, bombas, etc.) puedan las partículas desplazarse transportando el calor sin interrumpir la continuidad física del cuerpo. Por tanto, el movimiento del aire en un espacio acondicionado con un aparato de refrigeración genera un efecto que aumenta la pérdida de calor por convección en un cuerpo, éste efecto se reduce cuando el cuerpo o alguna de sus partes esta cubierto por alguna vestimenta.

La ropa reduce el efecto de enfriamiento, pues la convección se produce en la superficie de la ropa. La naturaleza de la ropa tiene un impacto como aislante. Sin embargo, cuando el aire en contacto con el cuerpo es más caliente que la temperatura de la piel, todos estos efectos actúan en la dirección opuesta para calentar el cuerpo.

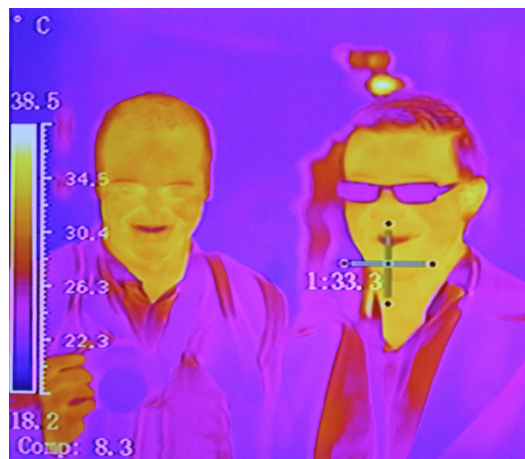
En conclusión, el calentamiento o enfriamiento del aire depende de la diferencia entre la temperatura del aire y de la piel (o superficie de la ropa).

## 11. CONFORT TERMAL

---

### Radiación

La radiación es la transmisión de calor entre dos cuerpos los cuales, en un instante dado, tienen temperaturas distintas, sin que entre ellos exista contacto ni conexión por otro sólido conductor. En cualquier caso, es una forma de emisión de ondas electromagnéticas (asociaciones de campos eléctricos y magnéticos que se propagan a la velocidad de la luz) que emana todo cuerpo que esté a mayor temperatura que el cero absoluto. El ejemplo perfecto de este fenómeno es el planeta Tierra. Los rayos solares atraviesan la atmósfera sin calentarla y se transforman en calor en el momento en que entran en contacto con la tierra. Todos los cuerpos emiten calor radiante en su superficie (ejemplo figura 11.2), y en cualquier situación real hay ventanas o techos que radian frío o calor, radiadores e incluso la propia radiación solar.



**Figura 11.2:** Ejemplo de emisión de calor por dos personas.

La radiación térmica tiene básicamente tres propiedades:

- Radiación absorbida: es la cantidad de radiación que incide en un cuerpo y queda retenida en él, como energía interna.
- Radiación reflejada: es la radiación reflejada por un cuerpo gris.
- Radiación transmitida: es la fracción de la energía radiante incidente que atraviesa un cuerpo.

La asociación mutua de los procesos de emisión, absorción, reflexión y transmisión de energía radiante por diferentes sistemas de cuerpos se conoce como intercambio de energía radiante. El aire, por lo tanto, en los sistemas de transmisión de calor, es un elemento totalmente pasivo, que no ejerce ninguna función fundamental en los resultados térmicos.

### Evaporación

Este proceso se produce cuando el agua se evapora tras extraer una cantidad de calor de su entorno. La evaporación del agua de la superficie de la piel significa que la mayor parte del calor latente se extrae de la piel y se enfría ésta. Este efecto de enfriamiento es muy potente, la evaporación de  $1\text{ g/minuto}$  es equivalente a  $41\text{ W}$  y es utilizado por el cuerpo para refrescarnos cuando sudamos. El movimiento del aire tiende a aumentar la evaporación. La evaporación también se produce con la respiración, mediante la superficie de los pulmones. La tasa de pérdida de calor de los pulmones depende de la actividad física y metabólica.

## 11.4 La ropa

En el confort termal, la ropa también juega un papel importante, no sólo para que el hombre pueda sobrevivir en las diferentes regiones del mundo, o incluso a climas extremos, sino también porque el modelo físico de transferencia de calor se ve afectado por la ropa al ser una capa de aislamiento entre el cuerpo y el medio ambiente.

La cara en particular, por lo general suele estar sin protección, pero el resto del cuerpo varía su aislamiento debido a las diferentes modas, culturas y periodos del año. Sin embargo, existen estudios a partir de los cuales se ha normalizado el aislamiento general de las prendas de vestir. Este se puede expresar como la suma de las contribuciones de los diferentes artículos de ropa que se usan. El aislamiento de la ropa se expresa generalmente mediante la unidad de medida CLO. Un CLO es el aislamiento necesario para mantener a una persona cómoda en  $21^{\circ}\text{C}$ .

La ropa, no solo actúa como aislante, sino también produce efectos sobre la pérdida de calor por evaporación. En primer lugar, la ropa afecta a la refrigeración

## 11. CONFORT TERMAL

---

por evaporación mediante la introducción de resistencia adicional a la difusión de vapor de agua de la piel. La fuerza de este efecto depende de la naturaleza de la ropa y su permeabilidad a la humedad. El segundo efecto es el enfriamiento evaporativo, es decir, absorbe el exceso de humedad de la piel. A continuación la humedad absorbida se evapora a partir de la prendas de vestir y no de la piel, por lo que el calor latente se elimina de la prendas de vestir y no es tan eficaz en el enfriamiento de la piel.

### 11.5 El comportamiento

El elemento más difícil de analizar es la interacción térmica con el medio ambiente. Todos los enfoques anteriores eran mayormente pasivos, sin embargo, las interacciones térmicas con el medio ambiente son acciones activas entre el hombre y el medio ambiente.

Se tratan de dos tipos de interacciones:

- Acciones como el cambio de ropa, la postura o la tasa metabólica, hacen que se modifique la temperatura a la que se encuentran cómodos, son acciones que se toman con el fin de adaptarse a las condiciones existentes.
- Acciones que cambian el entorno para que coincida con la temperatura asociada a la comodidad de los ocupantes.

Estas interacciones son generalmente bajo control consciente y aumentan las reacciones fisiológicas inconscientes a las que se ha hecho referencia anteriormente. Asimismo, existen otras acciones asociadas al confort que tienen un tiempo asociado:

- Instantánea: producida por el cambio de ropa en previsión de un cambio térmico.
- En el propio día: los cambios de ropa, los cambios en la postura o el ajuste del ambiente. Se utilizan para hacer frente a entornos imprevistos en un determinado momento del día.



- Día a día: acciones asociadas al conocimiento de cambios en las condiciones climáticas.
- A más largo plazo: los cambios estacionales en la ropa, el uso de los edificios, las actividades.

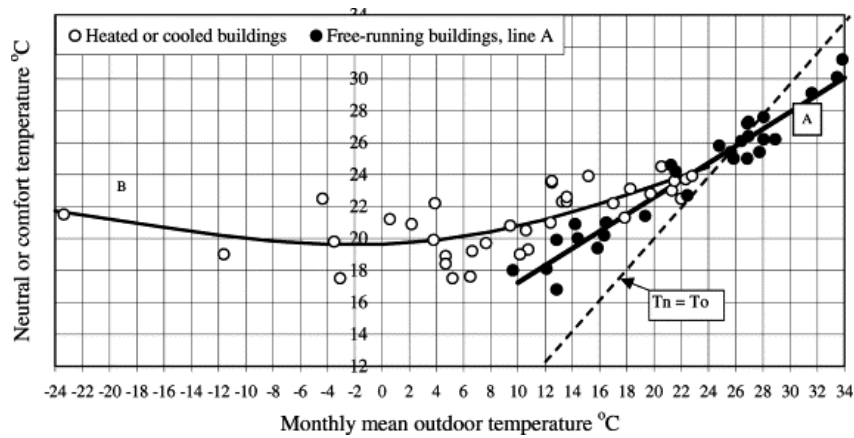
### 11.6 Adaptación

En su mayor parte, los intentos para caracterizar las interacciones humanas y sus comportamientos, o las acciones que realizan en las ventanas y otros controles se basan en el principio de la adaptación, que dice: “Si se produce un cambio tal que produzca incomodidad, la gente reacciona de la manera que tienda a restaurar su comodidad” [Nicol y Humphreys, 2002]. Este principio se aplica a los estudios de campo realizados en una gran variedad de ambientes. El principio vincula el voto realizado por los usuarios sobre el confort a las acciones que realizan los ocupantes. El voto permite relacionar las variables climáticas al contexto en el que los sujetos se encuentran, puesto que la temperatura de confort es el resultado de la interacción entre los sujetos y el edificio o entorno.

Para los investigadores de la escuela adaptativa, la variable contextual principal es el clima, puesto que éste influye de manera primordial en la cultura y las actitudes térmicas de cualquier grupo de personas y en el diseño de los edificios que habitan. No es posible cambiar los mecanismos básicos que relacionan el ambiente térmico con el cuerpo, sin embargo, existen otros elementos que ejercen influencia por la manera de adaptarse al entorno (por ejemplo, la postura o la ropa). Esto implica que la temperatura de confort está cambiando continuamente. En este sentido, sería interesante conocer el grado y velocidad en que estos cambios se producen.

En [Humphreys, 1978] se presenta la temperatura de confort interior frente a la temperatura media mensual al aire libre. A partir de una serie de encuestas realizadas en todo el mundo, encontró diferencias entre las personas en edificios con y sin acondicionamiento mecánico. Se observó, que la relación de los edificios sin acondicionamiento mecánico (free-running) era muy lineal. Sin embargo, en los edificios con calefacción y enfriamiento mecánico, la relación era más compleja.

## 11. CONFORT TERMAL



**Figura 11.3:** El cambio en la temperatura de confort respecto de la temperatura exterior [Humphreys, 1978].

En la figura 11.3 se presenta el cambio en la temperatura de confort respecto de la temperatura exterior, donde cada punto representa el valor medio de una encuesta. Para [de Dear y Brager, 1998], los ocupantes de edificios acondicionados mecánicamente tienen diferentes expectativas que los ocupantes de edificios con ventilación natural. Aunque no parece que sea probable que los usuarios de un edificio varíen sus respuestas en función de las expectativas.

Aun así, el uso sólo de la temperatura exterior para el cálculo de temperaturas de confort pasa por alto otros factores como la humedad o el movimiento del aire. [Orosa y Oliveira, 2011] considera que los problemas aparecen cuando los modelos adaptativos sugieren la misma temperatura neutral para ambientes con la misma temperatura interior pero distinta humedad. La temperatura de confort es claramente una función de algo más que la temperatura exterior. Aunque el aislamiento de la ropa de las personas también depende de la temperatura del aire libre exterior, al igual que el uso de los sistemas de control. Otros ejemplos son:

- La postura, donde [Raja y Nicol, 1997] han demostrado que las personas varían su postura con la temperatura.
- La tasa metabólica, donde [Baker y Standeven, 1995] han sugerido que la tasa metabólica para una actividad determinada puede variar con la temperatura.

- Los ocupantes, también se adaptan a su ambiente tras acciones como la apertura de ventanas, ajuste de persianas y ajuste de la calefacción o refrigeración.

Por lo que se dice que tras estos procesos, las personas están en equilibrio dinámico con su entorno. Este modelo de adaptación ha sido explicado por Nicol y Humphreys en [Nicol y Humphreys, 1973] y [Humphreys, 1998], por de Dear y Brager en [DeDear et al., 1997] y más ampliamente por Nicol, Humphreys y Roaf [Nicol et al., 2012].

En la figura 11.3 de [Humphreys, 1978] se utiliza los registros de la media mensual de la temperatura del aire exterior como variable determinante. Sin embargo [de Dear y Brager, 1998] utilizar la media de la temperatura efectiva al aire libre sin definir el período en el que se ha medido. Pero el clima puede cambiar dramáticamente en un mes, y el cambio no se reflejaría en una estimación mensual.

Más tarde, un equipo dirigido por Nicol recogió y analizó datos de Europa, con lo que aumentaron las relaciones adaptativas entre el clima y confort interior, aplicables en Europa [McCartney y Nicol, 2002] [EN15251, 2007].

Finalmente, tras varios estudios, se desarrolla el proyecto “SCATs”, éste está basado en una base de datos de respuestas de confort térmico en oficinas, de dichos datos nace la relación de adaptación incluida en la norma europea EN 15251 [EN15251, 2007]. El proyecto SCATs fue un estudio del ambiente interior de las oficinas europeas durante un año. El proyecto incluye un conjunto de edificios seleccionados en Francia, Grecia, Portugal, Suecia y el Reino Unido. En ellos, cada mes se realizó una encuesta en cada oficina-edificio participante. Las encuestas arrojaron unas 5.000 respuestas de carácter subjetivo evaluadas en base a la escala de ASHRAE, cada una fue acompañada con las correspondientes medidas de la temperatura del aire, la temperatura de globo, la velocidad del aire y la humedad relativa, junto con las estimaciones de aislamiento de la ropa y la tasa metabólica. Datos meteorológicos horarios contemporáneos se obtuvieron de estaciones meteorológicas cercanas.

La temperatura de confort ( $T_{comf}$ ) proviene de cada entrevista individual. Se realizó un estudio de la temperatura operativa en la que los ocupantes se encontraban en una situación de neutralidad térmica según las divisiones de la escala de ASHRAE que corresponden a un cambio de la temperatura operativa de  $2^{\circ}C$ ,

## 11. CONFORT TERMAL

---

cada temperatura de confort se basaba en una sola sensación térmica, por lo tanto está sujeto a cierta incertidumbre. El valor  $2^{\circ}\text{C}$  se adoptó tras realizar un estudio de la regresión de la sensación térmica a partir de la temperatura operativa de cada edificio en cada mes, y después de hacer un ajuste aproximado para permitir el efecto de la presencia de un error sobre el gradiente de la regresión en la variable que permite la predicción. Del proyecto surgió también un diagrama de dispersión entre las estimaciones puntuales de temperaturas de confort y la temperatura exterior. Finalmente, la métrica elegida para la temperatura exterior es una media móvil ponderada exponencialmente ( $T_{rm}$ ) de la temperatura media exterior tomada de forma diaria. Esta ponderación da mayor peso a temperaturas en el pasado más reciente, y progresivamente menos peso a las del pasado más remoto. Este índice es útil para predecir una temperatura interior confortable para un cierto clima, se expresa según la ecuación 11.1.

$$T_{rm}(\text{mañana}) = \alpha \cdot T_{rm}(\text{ayer}) + (1 - \alpha) \cdot T_{rm}(\text{hoy}) \quad (11.1)$$

El valor de  $\alpha$  representa la inercia térmica del edificio, junto con las respuestas de comportamiento retardadas de los ocupantes a los cambios de temperatura dentro del edificio, por lo que cabría esperar valores diferentes para aplicar a los edificios que tienen diferentes inercias térmicas.

La vida media ( $\lambda$ ) de una media móvil exponencialmente ponderada está dada por la relación  $\alpha = \frac{0,69}{(1-\alpha)}$  por lo que un valor de  $\alpha$  de 0,8 indicaría una vida media de aproximadamente 3,5 días. Esto indica que si hubiera un cambio radical en la temperatura media del aire, la temperatura de confort interior tomaría cerca de tres días y medio para mover la mitad del camino hacia su nuevo valor, o una semana para pasar las tres cuartas partes del camino. En [Humphreys et al., 2013] se presenta una comparación de las diferentes métricas de temperatura exterior.

Los mejores resultados se obtienen aplicando la ecuación 11.2.

$$T_{rm}(\text{mañana}) = 0,8 \cdot T_{rm}(\text{ayer}) + 0,2 \cdot T_{rm}(\text{hoy}) \quad (11.2)$$

Según los estudios, hasta que una solución más precisa sea encontrada, los valores que reflejan una mayor precisión se deben atribuir al valor de  $\alpha = 0,8$ .

Finalmente, y siguiendo el standard, la ecuación óptima de temperatura de confort queda de la siguiente manera:

En edificios libres de sistemas de refrigeración y calefacción:

$$T_{conf} = 0,33T_{rm} + 18,8 \quad (11.3)$$

En edificios con sistemas de refrigeración y calefacción:

$$T_{conf} = 0,09T_{rm} + 22,6 \quad (11.4)$$

En ambos casos, el margen superior se estima sumándole dos grados, y el inferior restándole dos grados.

### 11.6.1 Conclusiones

Tras esta introducción sobre el confort termal, se han presentado los principales argumentos para el estudio de éste. Posteriormente, se han presentado las dos escuelas o líneas de investigación actuales, las basadas en los modelos estáticos, y las basadas en los modelos adaptativos. De éste último, se ha presentado su ecuación fundamental, que se basa únicamente en la climatología exterior expresada en términos de temperatura media radiante. Sin embargo, otros sistemas adaptativos más complejos deben ser estudiados y comparados en el futuro. La presente tesis toma uno de los modelos estáticos existentes, que se presenta más adelante y desarrolla una metodología para generar un nuevo modelo adaptativo.

Los modelos estáticos están dando paso a nuevos modelos dinámicos, dado que el mundo es dinámico, se debe desarrollar un modelo dinámico mediante el cual se ajuste el edificio al confort de los usuarios y al coste de ese confort.



*Como meta, la arquitectura debe proponernos la creación de relaciones nuevas entre el hombre, el espacio y la técnica.*

Hans Scharoun

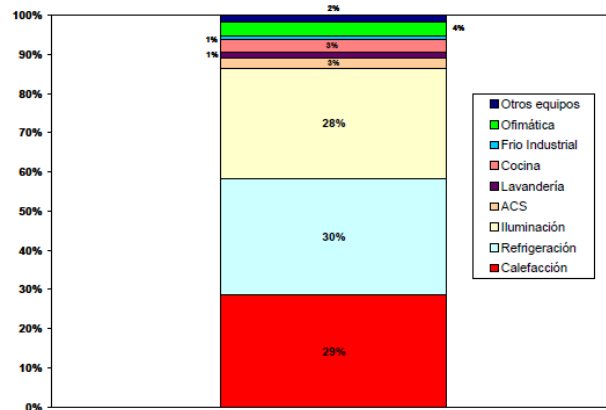
## CAPITULO 12

# Herramientas

Este capítulo se centra en los estudios e investigaciones en torno a la actividad diaria de los edificios, concretamente en la climatización, por ser ésta junto con la iluminación las acciones que genera mayor confort en el edificio. No obstante, como se puede ver en la figura 12.1: la iluminación (28 %), la refrigeración (30 %) y la calefacción (29 %); suponen el 87 % del consumo de energía del sector terciario. La cifra es bastante significativa a nivel nacional, puesto que el 17 % de la energía nacional se consume en el sector de la edificación, que comprende los servicios que tienen un mayor peso sobre el consumo energético de los edificios: las instalaciones térmicas (calefacción, climatización y producción de agua caliente sanitaria) y las instalaciones de iluminación interior; tanto en el sector doméstico (10 %) como en el sector terciario (7 %).

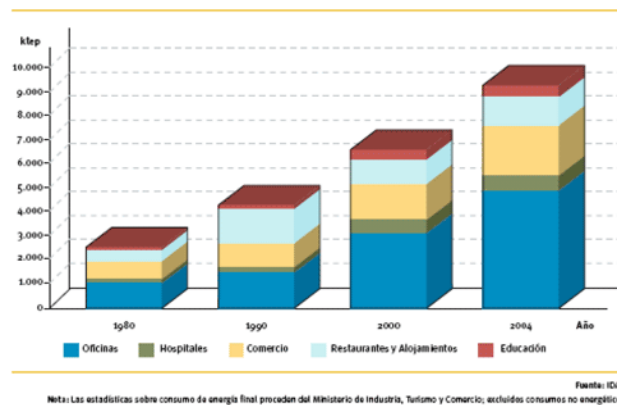
Como se puede observar en la figura 12.2, desde 1980 a 2004 el sector terciario ha incrementado su gasto energético. Igualmente, desde 1990 a 2005 el crecimiento del espacio edificado español aumentó en una tasa media anual del 9'5 % con un crecimiento del consumo anual del 4'8 %. Pero en la actualidad, se intenta frenar este avance consumista como se puede observar el Plan de Acción 2008-2012 (IDEA, 2007), que pretende reducir la demanda energética mediante la aplicación de criterios y sistemas de eficiencia energética. La principal barrera que encuentra el plan se debe a que la energía representa un 3 % del gasto de explotación general

## 12. HERRAMIENTAS



**Figura 12.1:** Distribución del consumo de energía en edificios terciarios, 2005 [IDEA, 2007].

de un edificio terciario, y un valor similar en el caso de las viviendas familiares, lo que implica que las medidas aplicadas pueden ser poco efectivas si la implantación no se realiza mediante normativas y leyes. En la figura 12.3 se observa que en 2011 se inició un cambio de la tendencia consumista que había precedido al sector residencial español.

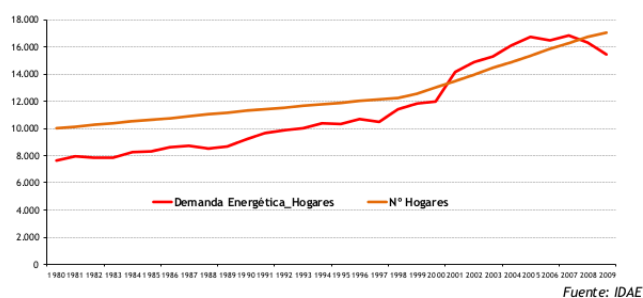


**Figura 12.2:** Consumo del sector terciario por sectores [IDEA, 2007].

El apartado 12.1 muestra como la domótica ha permitido integrar servicios que permiten gestionar la eficiencia energética y el confort de los ocupantes. Gracias a los sensores y las comunicaciones están surgiendo edificios inteligentes. El confort climatológico interior es uno de esos servicios. En los próximos apartados, se mos-



trará una revisión de las técnicas y la literatura relacionada con la aplicación del confort en edificios.



**Figura 12.3:** Tendencia del consumo energético (ktep) del sector residencial en España [IDEA, 2011].

## 12.1 Domótica y eficiencia energética

La domótica es “el conjunto de servicios proporcionados por sistemas tecnológicos integrados para satisfacer las necesidades básicas de seguridad, comunicación, gestión energética y confort, del hombre y de su entorno más cercano” [Krainier, 1996]. El término domótica proviene de la unión de las palabras domus, casa en latín, y tica, de automática en griego. Se entiende por domótica al conjunto de sistemas integrados en una vivienda que permite automatizarla, aportando servicios de gestión energética, seguridad, bienestar, comunicación, etc. Permitiendo el desarrollo de infraestructuras inteligentes, así como las tecnologías de información en edificios.

Los servicios que ofrece la domótica se pueden agrupar según cinco aspectos o ámbitos principales:

1. **Ahorro energético:** no se trata de una acción con un único camino, pues a este se puede llegar de muchas formas. En muchos casos, la sustitución de un aparato por uno de menor consumo no es la solución por el coste económico y energético de esta compra, en la mayoría de los casos el ahorro se encuentra en la gestión eficiente de los mismos. En los edificios se estudia el ahorro energético desde tres ámbitos de interés:

## 12. HERRAMIENTAS

---

- (a) Climatización: la programación y zonificación.
  - (b) Gestión eléctrica: racionalización mediante la desconexión de equipos de uso no prioritario en función del consumo eléctrico en un momento dado. Y gestión de tarifas, derivando el funcionamiento de algunos aparatos a horas de tarifa reducida
  - (c) Uso de energías renovables
2. **Confort:** conlleva todas las actuaciones que se puedan llevar a cabo que mejoren el confort en una vivienda. Dichas actuaciones pueden ser de carácter tanto pasivo, como activo o mixtas.
- (a) Iluminación: gestión, automatización y regulación del encendido y nivel de luminosidad.
  - (b) Climatización: gestión, automatización y regulación del encendido y nivel de acción de los elementos de confort con aporte energético, ya sea ventilación, calefacción o aire acondicionado.
3. **Seguridad:** consiste en una red de seguridad encargada de proteger tanto los bienes patrimoniales como la seguridad personal.
- (a) Alarmas de detección de incendios, fugas de gas, escapes de agua, concentración de monóxido en garajes cuando se usan vehículos de combustión.
  - (b) Acceso
4. **Comunicaciones:** son los sistemas o infraestructuras de comunicaciones que posee el edificio. Tanto para los usuarios de internet como para los aparatos electrónicos y elementos de transmisión de alarmas e información de gestión del edificio.
5. **Tele-gestión y accesibilidad:** que engloba el estudio de la accesibilidad del edificio por sus usuarios con independencia de discapacidades o dificultades que puedan tener.

### 12.2 Los edificios inteligentes

En la actualidad hay una tendencia al desarrollo de edificios inteligentes o eficientemente optimizados. Aunque el término no tiene una definición consensuada por la comunidad internacional, existen diversas definiciones acordadas en algunos simposios relacionados con la edificación:

“Un edificio inteligente combina innovaciones, tecnológicas o no, con una gestión competente a efectos de maximizar el retorno de la inversión” [Harrison et al., 1998].

“Un edificio que usa los cuatro elementos fundamentales de la construcción: estructura, sistemas, servicios y gestión, así como su interacción optimizada a efectos de maximizar el retorno en la inversión y proporcionar un ambiente de trabajo altamente eficiente, confortable y conveniente” AIBI (American Intelligent Building Institute).

“Un edificio que le permita a los usuarios desarrollar su máxima eficiencia al menor coste de operación posible y que usa eficientemente sus recursos. Esto significa que el edificio debe proveer de una respuesta rápida, altamente eficiente y que genere un ambiente sostenible para el usuario, de manera que logre la consecución de sus objetivos de negocio” EIBG (European Intelligent Building Group) [Sidwell, 1996].

“Un edificio inteligente es aquel que brinda adecuadas respuestas al usuario y tiene la habilidad de adaptarse a las nuevas tecnologías o cambios en las estructuras organizacionales” DEGW (An international building design consultancy company) [So y Chan, 1999].

“Un edificio inteligente es aquel que proporciona un entorno productivo rentable a través de la optimización de los cuatro elementos básicos: sistemas, estructuras, servicios y gestión. Junto con la interrelación entre ellos” [Robathan et al., 1989].

“Un edificio inteligente es aquel que utiliza la tecnología informática para gobernar de manera autónoma y adaptar el entorno de la edificación a fin de optimizar el confort del usuario, el consumo de energía, la seguridad y eficiencia en el trabajo” [Hagras et al., 2003].

## 12. HERRAMIENTAS

---

En todas estas definiciones, queda latente la necesidad de optimizar y automatizar el edificio para proporcionar al usuario el conveniente confort. Para lo cual todo edificio inteligente necesita de elementos que le permitan conocer el estado actual del edificio. Aquí es donde los sensores se convierten en pieza fundamental en la actividad diaria del edificio.

### 12.3 Los sensores, elemento indispensable en los edificios inteligentes

El objetivo de este apartado es entender de manera breve el estado actual de las aplicaciones, investigaciones y situación del desarrollo de los sistemas basados en sensores que se han desarrollado para todo tipo de edificios. En el capítulo 16 se centra en los sensores asociados a esta investigación.

Una red de sensores inalámbricos (WSN, *Wireless Sensor Networks*) es una red que consiste en la distribución espacial de dispositivos autónomos que mediante sensores supervisan cooperativamente condiciones físicas o ambientales, tales como la temperatura, sonido, vibración, presión, movimiento, contaminación, etc. en diferentes lugares. Estas tecnologías están asociadas a estándares que permiten la comunicación entre dispositivos de forma remota, cada una con una serie de ventajas e inconvenientes según qué tarea se quiera realizar. Para aplicaciones con poco ancho de banda destacan los estándares Bluetooth y ZigBee, pensados para la transmisión de pocos datos a corto alcance. Por otro lado existen tecnologías como los estándares 802.11 (WiFi) o 802.16 (WiMAX) de IEEE (*Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos*), que están pensados para el intercambio de grandes cantidades de datos a distancias que abarcan desde una simple habitación hasta una ciudad completa.

Las redes WSN no están pensadas para la transmisión de datos a nivel de usuario, sino más bien para el intercambio de paquetes entre diferentes dispositivos hardware que permitan una mayor percepción del entorno.

Los objetivos de investigación actuales tienden a la generación de prototipos de sistemas integrados de sensores con especial atención al bienestar de los ocupantes. En este campo existen varias corrientes de desarrollo e investigación:

### 12.3 Los sensores, elemento indispensable en los edificios inteligentes

---

- Medición y gestión de la energía aplicada a la ventilación, calefacción y aire acondicionado.
- La información y el transporte, tales como redes asociadas a la carga en el transporte vertical o de escaleras mecánicas, sensores de contacto respecto a suelos, sillas, etc. o barreras de detección de paso por puertas.
- La seguridad y los sistemas de seguridad, mediante el control de acceso por autenticación biométrica, cámaras inteligentes, sistemas de incendios, etc.
- El mantenimiento y gestión de instalaciones industriales.
- La gestión de la iluminación.
- Las comunicaciones de los ocupantes.

A diferencia de un conjunto simple de sensores, en este tipo de sistemas cada sensor estará conectado a un pequeño dispositivo dotado de cierta capacidad de cómputo, por lo que se podrán programar los diferentes nodos que forman la red para que transmitan la información que crean relevante, para generar alarmas de forma automática y realizar operaciones de forma distribuida, librando así de multitud de cálculos a la estación central que controla estos dispositivos.

Actualmente en el mercado existen multitud de sensores que permiten medir casi cualquier variable deseada. En este sentido, cada vez son más los fabricantes que proporcionan sensores, existiendo una gran cantidad de sensores en el mercado para poder medir magnitudes físicas. En la figura 12.4 se enumeran algunos de éstos.

Temperatura	Humedad	Presión	Posición	Movimiento	Caudal
Luz	Imagen	Corriente	Resistividad	Biométricos	Acústicos
Imagen	Aceleración	Velocidad	Inclinación	Químicos	...

**Figura 12.4:** Tipos de Sensores.

## 12. HERRAMIENTAS

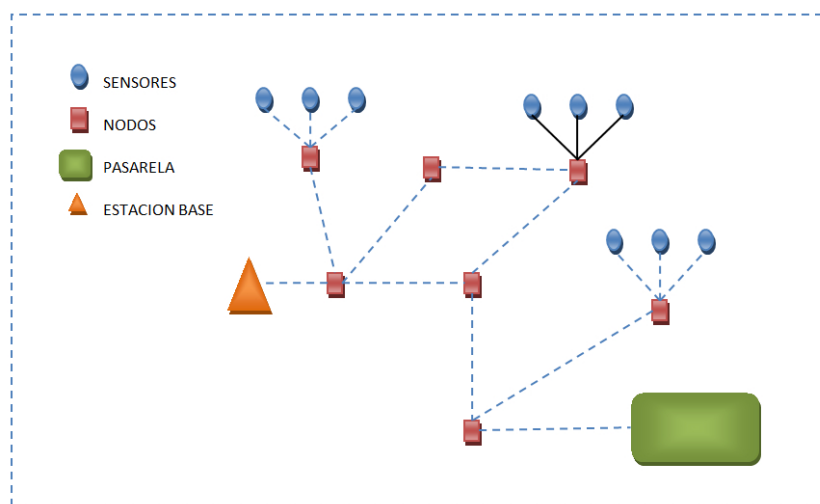
---

Las WSN destacan por la posibilidad de acoplar cualquier sensor a una red inalámbrica que permita la transmisión sencilla del valor medido. Las redes de sensores no están formadas únicamente por los nodos, sino que se necesitan diversos elementos para que éstas funcionen correctamente:

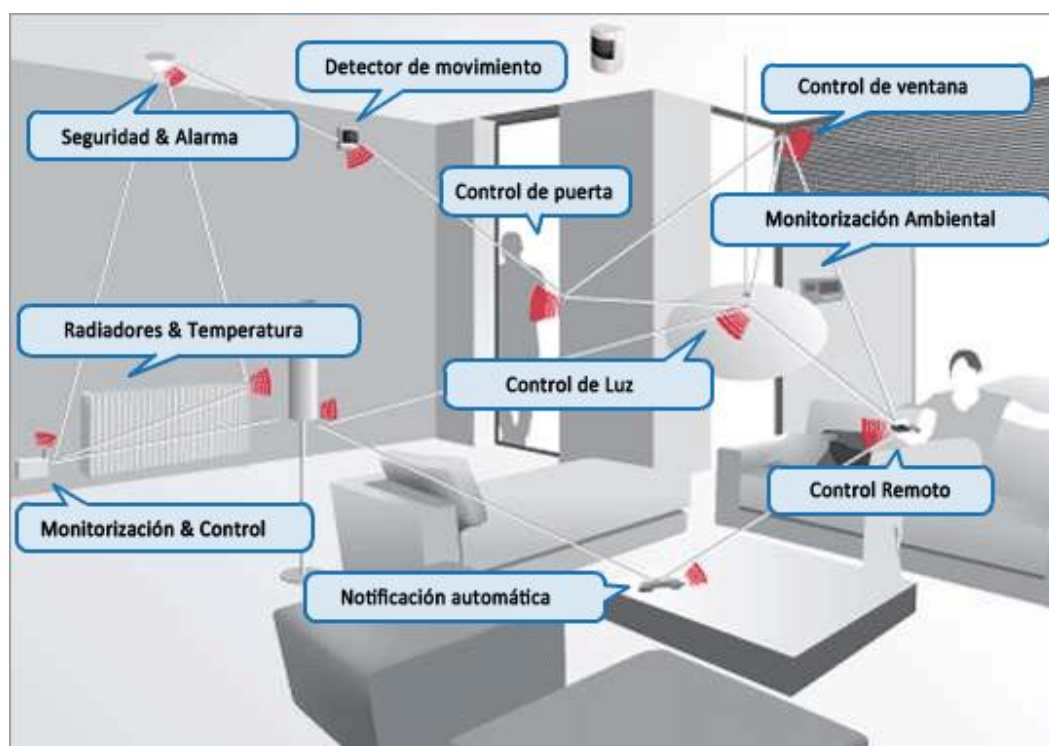
- **Sensores:** serán los encargados de transformar la información del entorno en impulsos eléctricos, de forma que los nodos sean capaces de entender dicha información.
- **Nodos sensor:** son dispositivos con capacidad de cálculo, así como un enlace radio para comunicarse con el resto de nodos.
- **Gateway o pasarela:** realiza la interconexión entre la red de sensores y una red TCP/IP.
- **Estación base:** recolecta los datos. Normalmente será un ordenador común o un sistema empujado y, en muchos casos, podrá hacer de pasarela.
- **Red inalámbrica:** estará basada en el estándar ZigBee o cualquier otra forma de comunicación vía radio. Cuya ventaja está en que los dispositivos se pueden insertar en la composición de la red sin necesidad de un punto de acceso que de infraestructura.

La figura 12.5 muestra un ejemplo de red de sensores, que serán la base necesaria para cualquier sistema experto que en el futuro quiera trabajar dinámicamente con las variables que generan confort o permitan calcular el ahorro energético en un edificio. La figura 12.6 muestra un ejemplo de las aplicaciones y controles que necesitan del uso de sensores. En el capítulo 16 se presenta una comparativa de las redes y los sensores de interés para esta investigación mediante una tecnología de hardware libre.

## 12.3 Los sensores, elemento indispensable en los edificios inteligentes



**Figura 12.5:** Estructura de una red de sensores inalámbricos.



**Figura 12.6:** Ejemplo de sensores en una sala.

### 12.4 Índices de bienestar

Las actuales investigaciones científicas en el ámbito de la edificación tienden a relacionar la eficiencia energética y el medio ambiente de los edificios hacia un enfoque centrado en el estudio del bienestar de sus ocupantes [Steeners y Manchanda, 2010].

Un estudio realizado por la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos [EPA, 2003] relaciona el aire interior con el rendimiento de los estudiantes y demostró que cambios moderados en la temperatura ambiente, incluso dentro de la zona de confort, afectan a las capacidades de los estudiantes a la hora de realizar tareas mentales que requieren concentración, como sumas, multiplicaciones o la comprensión de frases. En general, las temperaturas más cálidas tienden a reducir el rendimiento, mientras que las temperaturas más frías reducen la velocidad y destreza manual.

La importancia de la calidad del ambiente interior no sólo afecta al bienestar, sino también a la productividad de las personas. Por esta razón, las normas internacionales también están comenzando a avanzar hacia una reglamentación centrada en las personas [ASHRAE, 2008] y no sólo en el ahorro energético.

El bienestar de las personas comúnmente se define en términos de su salud, confort y felicidad. El confort se puede analizar como una respuesta para mantener la salud o un estado de completo bienestar (físico, mental y social), y no sólo como “la ausencia de la enfermedad” [OMS, 2009]. Es decir, la comodidad se extiende más allá del cuerpo físico pues contiene significados emocionales, sociales y culturales. Los factores psicológicos como el estrés, el optimismo y las creencias personales pueden tener un impacto en el confort, por tanto, las condiciones ideales deben estar asociadas a más de una “sensación de neutralidad” y no se deben ignorar los factores contextuales en la creación de ambientes interiores.

El bienestar es el resultado de una interacción compleja formada por un conjunto de parámetros. En la tabla 12.1 se puede observar una clasificación general de éstos.

Por otra parte, estos parámetros de los que depende el confort térmico se pueden ordenar en dos grupos, aquellos que depende del propio ocupante (factores del



**Tabla 12.1:** Parámetros y factores del bienestar.

<b>Parámetros</b>	<b>Ambientales</b>	Temperatura del aire
		Humedad relativa
		Velocidad del aire
		Temperatura radiante
<b>Factores</b>	<b>Personales</b>	Sexo
		Edad
		Peso (constitución corporal)
		Tasa de metabolismo basal muscular
		Vestimenta
		Estado de salud
		Historial térmico inmediato
		Tiempo de permanencia
		Área de piel expuesta
	<b>Socioculturales</b>	Expectativas de confort
	<b>Arquitectónicos</b>	Adaptabilidad del espacio
		Contexto visual con el exterior

usuario) y otro que depende del recinto o entorno en el que se encuentra (ambientales y arquitectónicos).

Para manejar esta combinación múltiple de parámetros se crearon los índices de bienestar, a partir de los cuales resulta más sencillo conocer sus efectos. Según el número de magnitudes que se empleen, el grado de precisión que se obtenga o el objetivo que se pretenda, en la tabla 12.2 se encuentran agrupados los índices de bienestar más generales.

Todos los índices aportan información sobre el confort de una manera parcial. Los más simples se denominan índices de bienestar directos, entre ellos están la temperatura, la humedad y la velocidad del aire. De los tres es la temperatura la que aporta mejor información, aunque en ocasiones puede llegar a ser engañosa. La humedad, por si sola suele ser significativa sólo en sus extremos inconfortables, es decir, por debajo del 20-30 % o por encima del 70-80 %. Sin embargo, la velocidad del aire tampoco aporta información trascendente por sí sola.

Los índices de bienestar derivados, que como su nombre indica, provienen de los índices anteriores, son de mayor interés en lo que al confort se refiere. El pri-

## 12. HERRAMIENTAS

**Tabla 12.2:** Índices de bienestar.

<b>Índices de bienestar directos</b>	Temperatura
	Humedad
	Velocidad del Aire
<b>Índices de bienestar derivados de los directos</b>	Temperatura media radiante
	Temperatura equivalente
	Temperatura operativa
	Temperatura operativa humedad
<b>Índices de bienestar empíricos</b>	Temperatura efectiva
	Índice de enfriamiento por viento
	Voto medio observado
	Voto medio previsto
	Índice de confort ecuatorial
	Porcentaje de personas insatisfechas
	Índice de temperatura húmeda - Temperatura de globo

mero de ellos es la *Temperatura Media Radiante* ( $T_{mr}$ ) de un ambiente, se define como la temperatura uniforme de un local negro imaginario que produzca la misma pérdida de calor por radiación en las personas que en el local de origen.

Un segundo índice derivado de los directos es la *Temperatura Equivalente* ( $T_{eq}$ ), que es la temperatura a la que habría que tener el aire y las paredes de un recinto para provocar sobre el individuo idéntica sensación que en el local de origen.

La *Temperatura Operativa* ( $T_o$ ) es la temperatura a la que hay que tener el aire y las paredes de un recinto para que un individuo intercambie con él; el mismo calor sensible que en el local de origen.

La *Temperatura Operativa Húmeda* ( $T_{oh}$ ) representa una pequeña variación sobre el índice anterior. Éste precisa que el recinto también se encuentre saturado para que el intercambio equivalente al del local de origen se realice por convección, radiación y evaporación-transpiración.

En la actualidad existen normativas basadas en el bienestar y las características ambientales. El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) incorpora normas para determinar las condiciones interiores de bienestar térmico basadas en índices de bienestar más completos. Por ejemplo, el índice de fatiga térmica

ca, que indica la relación entre la pérdida de calor por evaporación-transpiración en una cierta situación y la máxima pérdida posible por el mismo mecanismo. Otro ejemplo, el índice de humedad de la piel, que es similar al anterior, pero relaciona cantidades de sudor producidas y no el calor eliminado por ellas.

Existe una tercera familia de índices, denominada de índices empíricos. Éstos contienen algunos de los más importantes índices, entre ellos destacan: la temperatura efectiva y el índice de enfriamiento por viento. El segundo tiene en cuenta el movimiento del aire para la medida de la sensación de calor. Sin embargo, el más referenciado en la literatura es el voto medio estimado o previsto (PMV, *Predicted Mean Vote*). Éste último se obtuvo experimentalmente con un grupo de personas. Mediante el cual se consiguió una calificación de la sensación provocada por el ambiente en función de diversas variables. El PMV se relaciona directamente con otro índice, el porcentaje de personas insatisfechas (PPD, *Predicted Percent of Dissatisfied*). La estimación del estrés térmico del hombre en el trabajo se puede cuantificar mediante el índice THTG (Temperatura Húmeda-Temperatura de Globo).

Se puede constatar que para poder trabajar con todo el conjunto de parámetros de bienestar, se han creado índices arbitrarios que, de una manera u otra, engloban todas o la mayor parte de las acciones. Entre ellos destaca la *Temperatura Efectiva* ( $T_{ef}$ ), que es capaz de englobar en un único valor los efectos de la temperatura, humedad y movimiento del aire. De este modo, a la hora de fijar el confort de un local en función del tipo de ocupantes y de la labor que van a realizar, es suficiente con indicar la temperatura efectiva de confort que le corresponde. Esta temperatura efectiva se conseguirá con la combinación y modificación del contenido de humedad del ambiente, de su temperatura de bulbo seco o de la velocidad del aire, haciendo más hincapié en uno u otro en función de su mayor disponibilidad.

La temperatura efectiva se define como “un índice arbitrario que combina en un único valor el efecto de la temperatura, humedad y movimiento del aire en relación con la sensación de calor o frío sentida por el cuerpo humano”. Su valor numérico se obtuvo originalmente de forma experimental y corresponde al de un ambiente con el aire saturado y sin movimiento, que provocase una sensación idéntica. Es decir, la misma sensación de calor o frío, por tanto la misma temperatura efectiva, se puede obtener con diferentes combinaciones de humedad, temperatura y movimiento del aire.

## 12. HERRAMIENTAS

---

### 12.5 Escalas de sensaciones térmicas (PMV y PPD)

El bienestar térmico se puede definir como la condición mental que expresa la satisfacción con el ambiente térmico. Para relacionar la percepción mental con la fisiológica muchos autores han empleado ecuaciones empíricas y han recurrido a la estadística. Muestra de esto, es el éxito de Fanger y los índices denominados PMV y PPD que aportan información clara y concisa sobre el ambiente térmico. Y como se observará más adelante ha sido ampliamente utilizado en estudios, trabajos y aplicaciones. Aunque su éxito no ha sido rotundo, como ha manifestado [Van Hoof, 2008]. El éxito de estos índices se apoya en las diversas normas que la organización internacional de normalización ha desarrollado, y que se puede observar en la figura 12.7 que relaciona algunas metodologías para el cálculo de índices de confort.

La ecuación de Fanger expresa la combinación de los parámetros ambientales con las personas que producen sensación de neutralidad térmica. Si el equilibrio es positivo (calor generado es mayor que la pérdida) el individuo sentirá calor, y viceversa. Cuanto mayor sea el desequilibrio térmico, mayor será el número de personas que se encuentran insatisfechas. En la figura 12.8 se muestra las curvas de confort presentadas por Fanger, estas presentan las zonas de confort para una temperatura operativa y una humedad relativa dada.

El PMV, se basa en la respuesta media dada por un gran número de personas. Se expresa en función del desequilibrio térmico y de la actividad metabólica (ecuación 12.1).

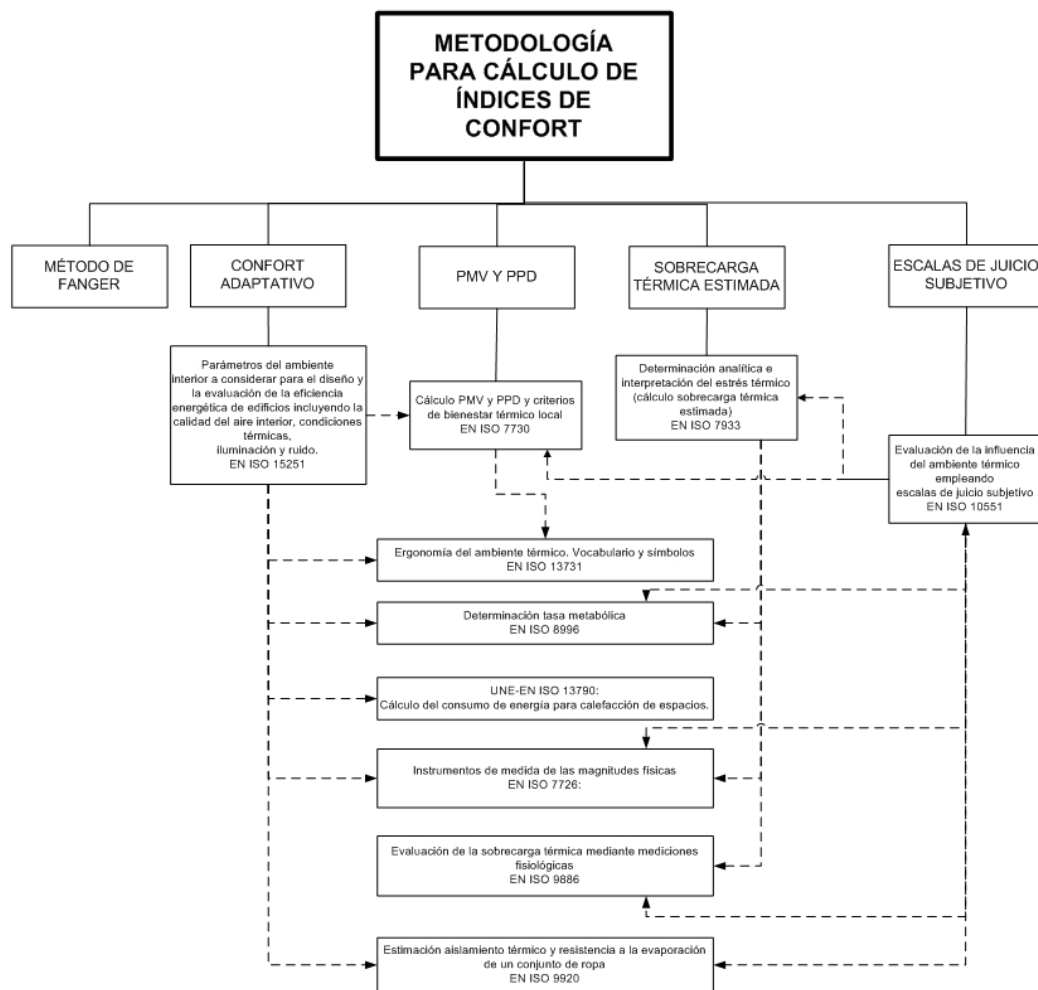
$$PMV = DT \cdot (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \quad (12.1)$$

Donde M representa el metabolismo del cuerpo humano relacionados con la actividad ( $W \cdot m^2$ ) y DT representa la carga térmica del cuerpo humano como resultado de su equilibrio térmico con el medio ambiente ( $W \cdot m^2$ ).

La calidad del ambiente térmico que representa el PMV, es función de los siguientes parámetros ambientales a medir en la zona ocupada:

- La temperatura seca del aire.

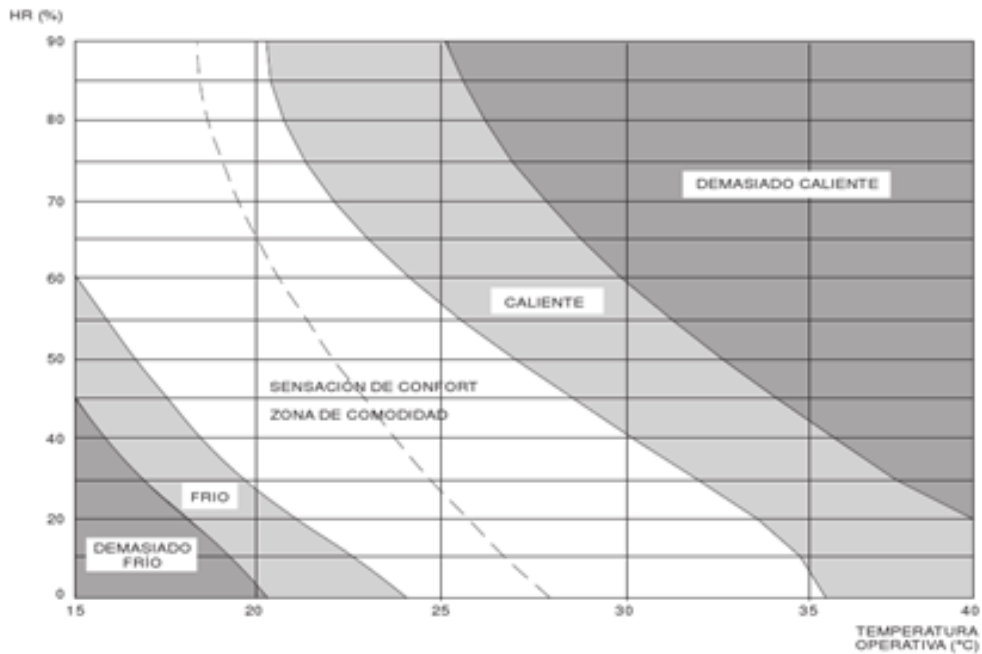
## 12.5 Escalas de sensaciones térmicas (PMV y PPD)



**Figura 12.7:** Metodologías para cálculo de índices de confort (AENOR)

## 12. HERRAMIENTAS

---



**Figura 12.8:** Curvas de confort de Fanger.

- La humedad relativa u otra magnitud que determine un punto sobre el diagrama del aire húmedo.
- La temperatura radiante media de los cerramientos del recinto.
- La velocidad media del aire.

Así como de los dos parámetros relativos a las personas, que son:

- La actividad metabólica.
- El grado de vestimenta.

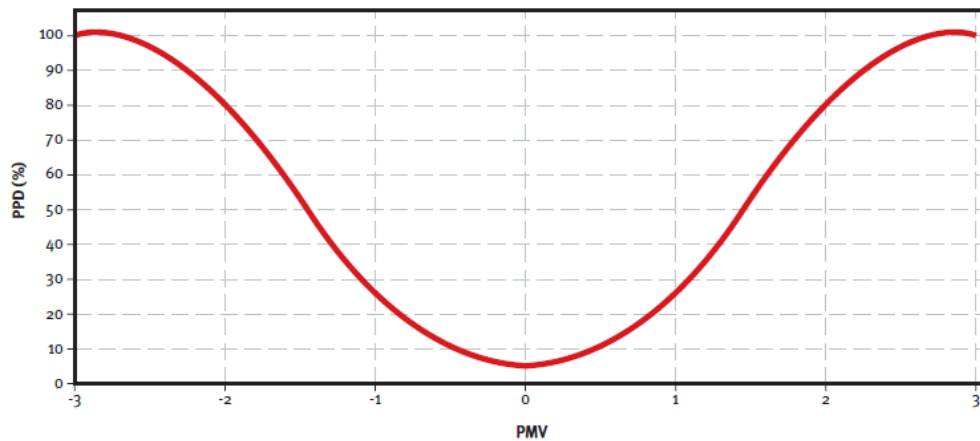
El empleo del PMV es válido solamente cuando los seis parámetros antes mencionados estén dentro de los límites mostrados en la tabla 12.3.

El índice PPD, establece una predicción cuantitativa del número de personas térmicamente insatisfechas. Este índice está relacionado con el PMV mediante la ecuación 12.2.

## 12.5 Escalas de sensaciones térmicas (PMV y PPD)

**Tabla 12.3:** Parámetros principales.

Parámetro	Límites	Unidad
Actividad metabólica	0,8 a 4	met
Grado de vestimenta	0 a 2	clo
Temperatura seca del aire	10 a 30	°C
Temperatura radiante media de los cerramientos	10 a 40	°C
Velocidad del aire en la zona ocupada	0 a 1	m/s
Humedad relativa	30 a 70	%



**Figura 12.9:** Porcentaje de personas insatisfechas.

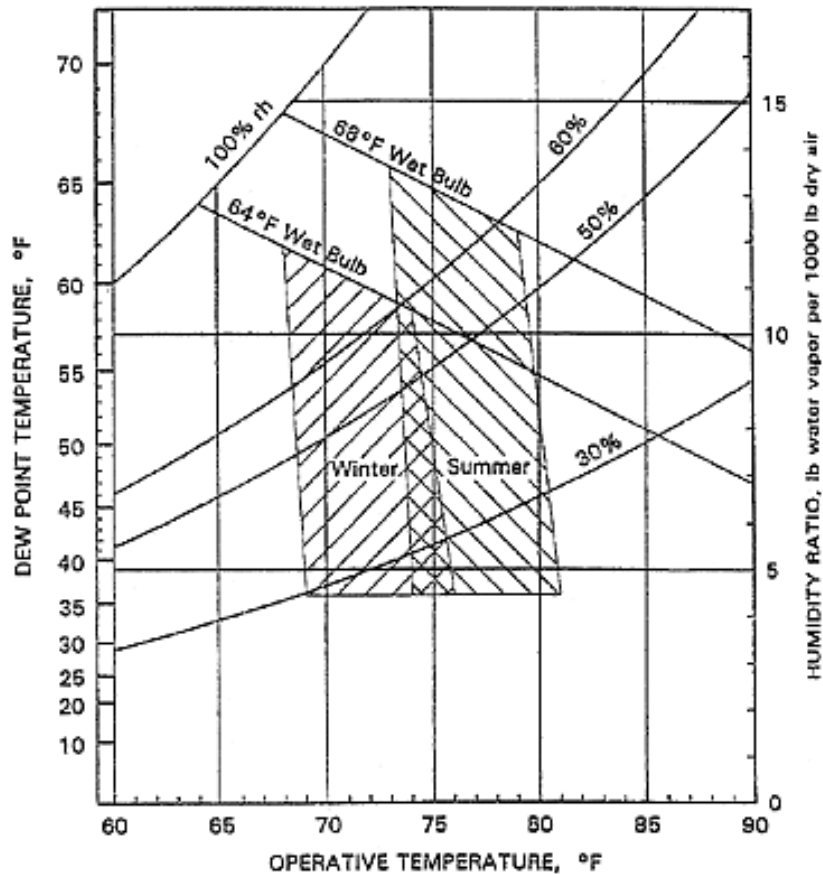
$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,2179 \cdot PMV^2 + 0,03353 \cdot PMV)} \quad (12.2)$$

La figura 12.9 revela que el porcentaje de personas insatisfechas no puede ser nunca, estadísticamente hablando, menor que el 5 %, aun cuando el PMV sea nulo.

Las condiciones térmicas admisibles en un ambiente están representadas por valores de PMV entre -1 y +1, correspondientes, aproximadamente, a un 25 % de personas insatisfechas. Dentro de este rango existen una sucesión de categorías que se pueden estudiar en [ATECYR, 2007] o en el documento UNE-15251 (2008) y su anexo A.

La zona de confort según [ASHRAE, 1997] es diferente en verano y en invierno. En la figura 12.10 se presentan ambas zonas.

## 12. HERRAMIENTAS



**Figura 12.10:** Áreas de bienestar en invierno y verano [ASHRAE, 1997].

Los índices PMV y PPD expresan el bienestar para el cuerpo en su conjunto. Sin embargo, el malestar térmico puede ser causado por un enfriamiento o calentamiento de una parte específica del cuerpo. La neutralidad térmica no es la única condición a satisfacer para obtener el bienestar. Una persona puede sentir satisfacción térmica en el conjunto de su cuerpo, pero no puede estar cómodo si en alguna parte de su cuerpo siente frío o calor. Las causas del malestar térmico son cuatro:

- Asimetría de la temperatura radiante.
- Diferencia vertical de temperatura.
- Suelo frío o caliente.
- Corrientes de aire.



Las corrientes de aire son la causa del mayor número de quejas sobre las instalaciones de HVAC, por la diferente exposición de las partes del cuerpo, y por su dependencia de la intensidad, temperatura y velocidad.

## 12.6 Punto de ajuste del confort

Un ejemplo sencillo muestra la necesidad de herramientas que permitan mantener el valor de ajuste de temperatura. Cuando una persona utiliza un sistema de calefacción simple, inicialmente enciende el calentador para aumentar la temperatura de su habitación hasta un valor aceptable (también llamado “Setpoint”). El problema surge cuando la temperatura de la sala sobrepasa este valor, por lo que la persona tiene que abrir un poco la ventana o puerta a otra sala para contrarrestar el calor y mantener el balance. El aire frío permite ajustar la temperatura hasta llegar a la temperatura deseada. En este caso, es un individuo el que está ejerciendo el control y toma las decisiones de abrir/cerrar la ventana o encender/apagar el sistema. Ante esta situación los investigadores se cuestionaron que fuera una maquina la que tomara las decisiones y mantuviera la temperatura que deseamos. Esta es la base de los sistemas de climatización para los cuales un PID es uno de los posibles elementos a utilizar.

### 12.6.1 Introducción a los PID

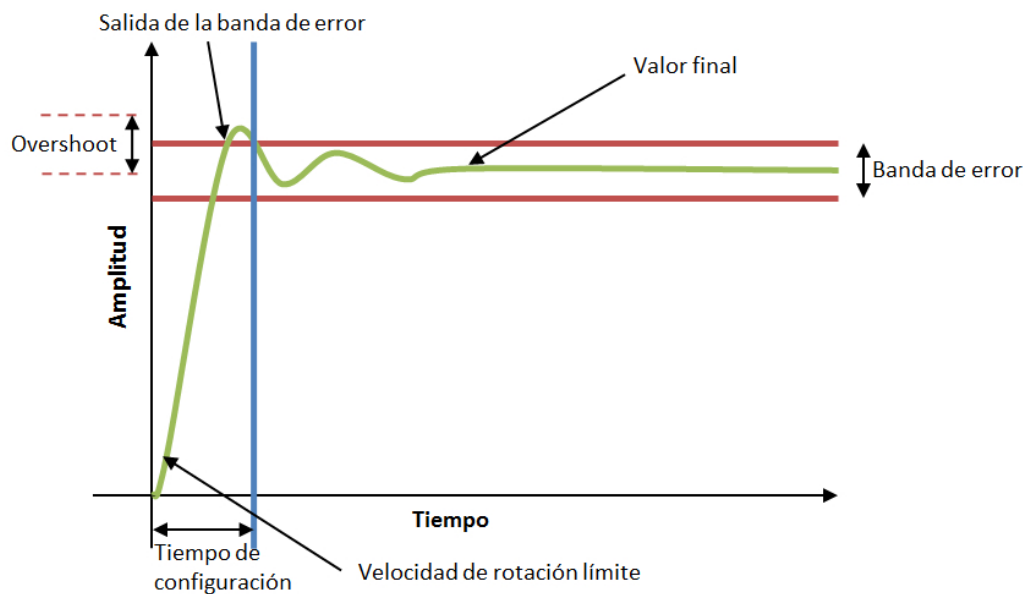
Los controladores PID (*Proporcional, Integral y Derivativo*) han sido una estructura aplicada durante décadas en el control de procesos continuos. Entendiendo procesos continuos como aquellos que regulan una magnitud que varía de forma continua en el tiempo pudiendo pasar por infinitos valores. Actualmente, existe una gran cantidad de productos industriales que lo utilizan. Adicionalmente, existen dispositivos semiconductores que tienen implementado por hardware este controlador. Por ejemplo, una regulación del caudal de aire de una salida de un HVAC.

Un PID es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso.

## 12. HERRAMIENTAS

---

El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El valor proporcional determina la reacción del error actual. El integral genera una corrección proporcional a la integral del error, ésta asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero. El derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar un elemento de control en proceso. En el caso de edificios con sistemas HVAC, los elementos de control son dampers (válvulas de control) o la energía suministrada a un sistema HVAC.



**Figura 12.11:** PID.

Como se puede observar en la figura 12.11, ajustando estas tres variables en el algoritmo de control del PID, mantiene o tiende a mantener un valor o “setpoint” (punto de ajuste) y su grado de oscilación, que se puede entender en términos de respuesta del control ante un error.

### 12.6.2 Funcionamiento

Para regular el funcionamiento, un controlador PID necesita de: un sensor que determine el estado del sistema (termómetro, medidores de caudal, etc.), un controlador que genere la señal de actuación y un actuador que modifique el sistema (válvula o similar). Aunque se ha observado una mejora potencial en el rendimiento al aplicar estos sistemas a los HVAC, los sistemas PI (Proporcional-Integral) siguen dominando los sistemas comerciales de HVAC, debido a que las investigaciones más avanzadas y recientes solo se han estado probando en simulaciones y no en los sistemas físicos [Soyguder y Alli, 2009a].

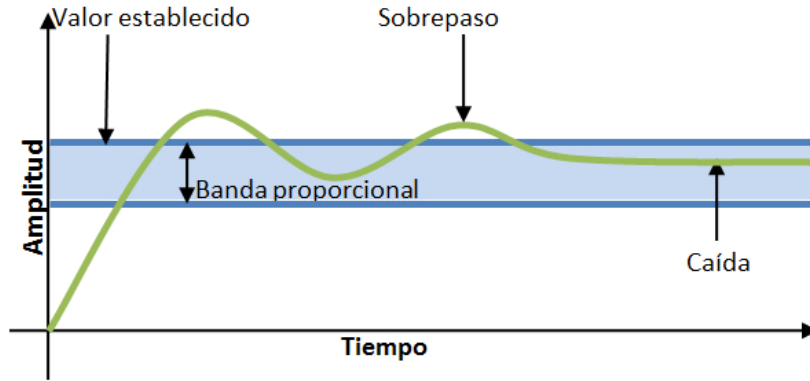
#### 12.6.2.1 Proporcional

La parte proporcional es el producto entre la señal de error y la constante proporcional buscada, cuyo valor haría que el error en estado estacionario sea casi nulo (figura 12.12). El valor resultante solo es óptimo en una determinada proporción, existiendo un error por oscilación si esta proporción es mayor de un 30 %. Existe una relación lineal entre el valor real y el objetivo, pues la válvula se mueve al mismo valor por unidad de desviación.

La ecuación del proporcional expresada en tanto por uno es  $P = \kappa_p e_p(t)$ , su valor indica la posición que pasa a ocupar el elemento final de control, que como se puede observar no toma en consideración el tiempo, por lo tanto, la mejor manera de solucionar el error permanente y hacer que el sistema contenga alguna componente que tenga en cuenta la variación respecto al tiempo, es incluyendo y configurando las acciones integral y derivativa.

## 12. HERRAMIENTAS

---



**Figura 12.12:** Proporcional.

### 12.6.2.2 Integral

El modo de control integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional.

El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de ajuste, integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional. El error es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un período determinado.

El control integral se utiliza para obviar el inconveniente del offset (o desviación permanente de la variable con respecto al punto de ajuste) de la banda proporcional.

La ecuación del integral es:

$$I = \kappa_i \int_0^t e_p(t) dt \quad (12.3)$$

Mover una válvula (elemento final de control) a una velocidad proporcional a la desviación respecto al punto de ajuste (variable deseada) es un ejemplo de su aplicación.

### 12.6.2.3 Derivativo

La acción derivativa se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error; (si el error es constante, solamente actúan los modos proporcional e integral). El error es la desviación existente entre el punto de medida y el valor de ajuste.

La función de la acción derivativa es mantener el error en valores mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce, de esta manera se evita que el error se incremente. Este valor se deriva con respecto al tiempo y se multiplica por una constante  $k_d$  y luego se suma a las señales anteriores (P+I).

La ecuación del derivativo es:

$$D = \kappa_d \frac{de_p(t)}{dt} \quad (12.4)$$

El control derivativo se caracteriza por el anticipo en el tiempo de acción. La acción derivada es adecuada cuando hay retraso entre el movimiento de la válvula de control y su repercusión en la variable controlada.

Cuando el tiempo de la acción derivada es grande, hay inestabilidad en el proceso. Cuando el tiempo de la acción derivada es pequeño la variable oscila demasiado con relación al punto de ajuste. Suele ser poco utilizada debido a la sensibilidad al ruido que manifiesta y a las complicaciones que esto conlleva. Razón por la que los PI dominan los sistemas comerciales de HVAC.

El tiempo óptimo de acción derivativa es el que retorna la variable al punto de consigna con las mínimas oscilaciones. La corrección de la posición de una válvula (elemento final de control) proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada es un ejemplo de aplicación.

La acción derivada puede ayudar a disminuir el valor excedido por la variable durante el arranque del proceso. Se puede emplear en sistemas que tienen un tiempo de retardo considerable. Ésta permite una repercusión rápida en la variable después de presentarse una perturbación en el proceso.

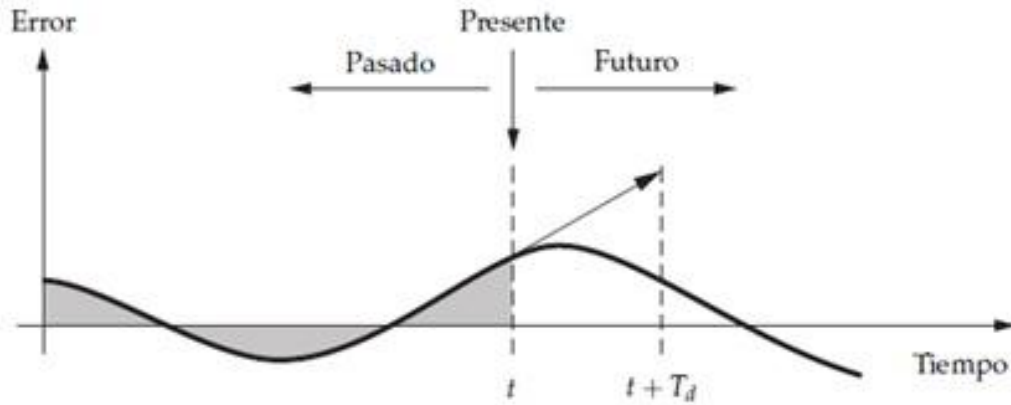
### 12.6.3 P+I+D

La acción de control es una suma de tres términos que representan, como se observa en la figura 12.13, el pasado por la acción integral del error (el termino-I), el presente (el termino-P) y el futuro por una extrapolación lineal del error (el termino-D).

Hay muchas variaciones del algoritmo PID básico que sustancialmente mejoraran su comportamiento y capacidad de operación. En la figura 12.14 se representa el diagrama de bloques de un control PID, donde las entradas son el valor del sensor ( $y$ ) junto con el valor requerido ( $y^*$ ). La salida de estos tres términos, se suma para

## 12. HERRAMIENTAS

---



**Figura 12.13:** Un controlador PID calcula su acción de control basándose en los errores de control pasados, presentes y futuros.

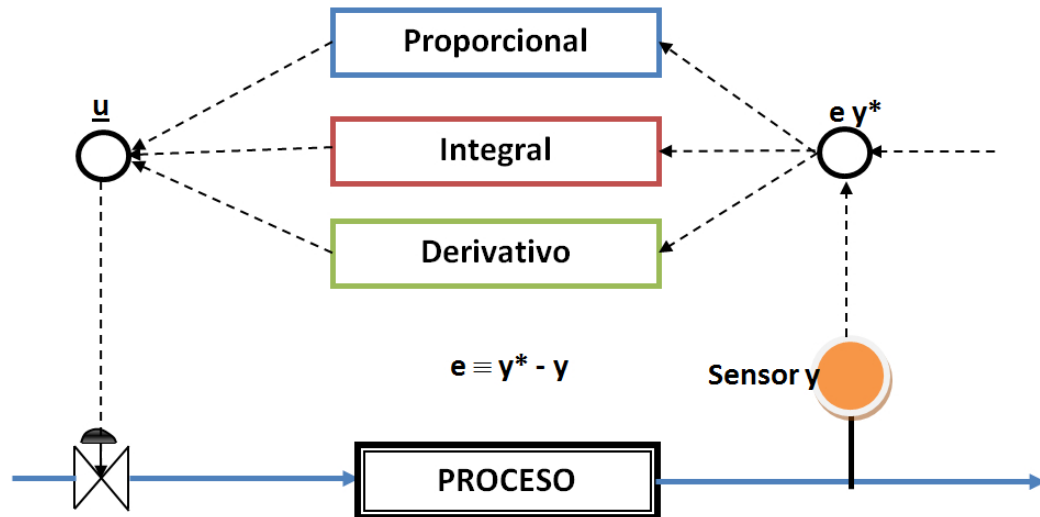
calcular la salida del controlador PID. Se define  $u(t)$  como la salida del controlador, la forma final del PID es:

$$u(t) = \kappa_p e_p(t) + \kappa_i \int_0^t e_p(t) dt + \kappa_d \frac{de_p(t)}{dt} \quad (12.5)$$

El valor de la salida  $u(t)$  es la que genera cambios en el actuador o dámper que regula los cambios en el proceso, en el caso de los HVAC regula la temperatura o salida de aire.

Este sistema se estudia para el mantenimiento de la temperatura de una sala en un valor determinado, y suele ser acompañado de otras técnicas como la lógica difusa.

Imagine que desea mantener la temperatura de una sala en  $24^\circ C$ , por tanto, se desea controlar la temperatura del aire de salida de un HVAC. En primer lugar se debe de poner un sistema de control del valor de temperatura y un termómetro, con la finalidad de tener una medición constante del valor de temperatura de la sala en que se aplica. El controlador irá vigilando que se mantenga la temperatura establecida; en el momento que detecte un error, mandará una señal de modo que esta se aumente o disminuya, corrigiendo así el error medido y obteniéndose la temperatura deseada o necesaria. El PID es un cálculo matemático, lo que envía la



**Figura 12.14:** Diagrama en bloques de un control PID.

información es el PLC (*Programmable Logic Control* o control lógico programable). Lo más correcto es poner un PID y si hay mucho ruido, un PI, pero un P no sería útil pues no llegaría a corregir el valor hasta el exacto.

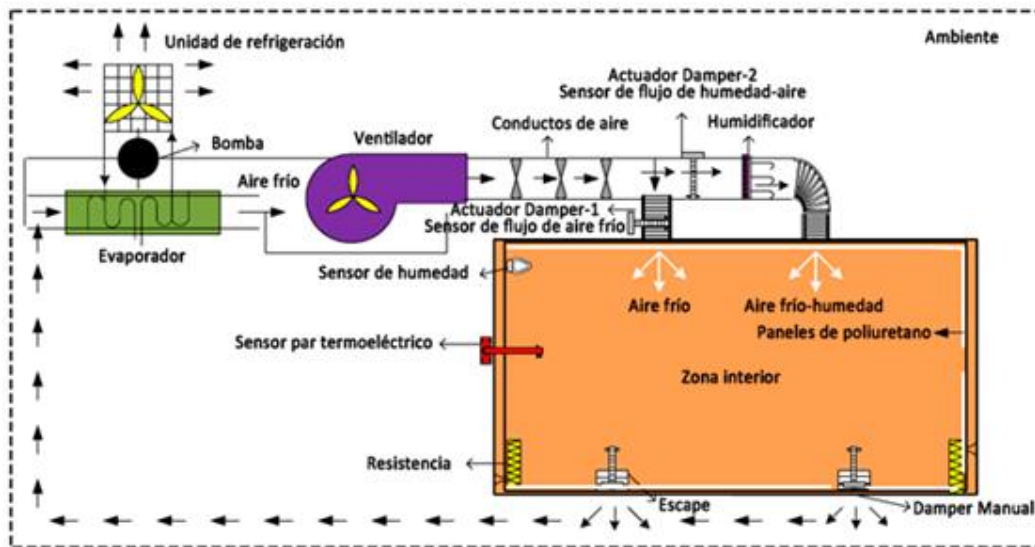
Sin embargo en [Kolokotsa, 2003], cuando esta técnica se aplica junto a la lógica difusa, se observa que todos los controladores borrosos (fuzzy P, fuzzy PID, fuzzy PI, fuzzy PD y adaptive fuzzy PD), satisfacen los requerimientos de confort interior, dando prioridad a las técnicas pasivas de calefacción, refrigeración e iluminación, y minimizando así el uso de la energía, mientras que el controlador borroso P garantiza el menor consumo de energía. La reducción del consumo de energía se logra mediante la eliminación de los excesos y las oscilaciones que contribuyen a aumentar de forma significativa el derroche energético. Todos los controladores son aplicables en cualquier edificio, sin necesidad de tener en cuenta las características específicas de construcción.

#### 12.6.4 PID en los edificios energéticamente sostenibles e inteligentes

El PID es una técnica ampliamente estudiada y aplicada en los trabajos que hacen referencia a sistemas de control de HVAC, estudios de confort o de eficien-

## 12. HERRAMIENTAS

cia energética. Algunos ejemplos son los sistemas expertos de [Soyguder y Alli, 2009a], [Soyguder et al., 2009], [Soyguder y Alli, 2009b], [Soyguder y Alli, 2010], [Soyguder, 2011], a partir de los cuales, conocida la temperatura que se desea para una sala, el sistema de control es capaz de ordenar al sistema de HVAC las acciones necesarias que hagan que se llegue y mantenga dicha temperatura. El sistema de control se compone en su diseño de dos actuadores (amortiguadores) de posición controlados por un controlador PID convencional. El estudio se basa en la obtención de la humedad y la temperatura deseada para cada paso de tiempo utilizando el algoritmo de control PID. En la figura 12.15 se muestra el diagrama o esquema del sistema modelado. Los principales elementos del sistema son: la zona de refrigeración, el evaporador, la unidad de refrigeración, ventiladores, actuadores-amortiguadores, canales, termómetro y sensor de humedad.



**Figura 12.15:** Esquema de un sistema HVAC con una única zona [Soyguder y Alli, 2009a].

Debido a que hacer un modelo matemático es muy complejo, se considera que se desprecian los efectos de las variaciones instantáneas de la velocidad del aire en el interior, y se supone que no hay fugas de aire, excepto las válvulas de escape de la cubierta, además se presume que el flujo de aire en la zona es homogéneo. Se realizan estudios donde el balance de masas mediante el valor de la masa absor-



bida por unidad de enfriamiento no cambia porque el ventilador tiene un número constante de revoluciones.

Sin embargo, la tasa de flujo de masa del aire que entra genera cambios en función de la temperatura de la zona. El flujo continuo de las variaciones de masas de aire de entrada en la zona se realiza mediante el control del hueco de las entradas en los canales interiores, en función de las señales de control de salida. Este flujo se controla mediante dampers, el diseño del aparato está formado por un conjunto de estos dampers o herramientas que apaga, amortigua, disminuye, o controla la fuerza de algo. De manera que si se encuentra en un ángulo de  $0^\circ$  el damper está abierto, y a  $90^\circ$  está cerrado. En este estudio, como en otros de la literatura en la que se aplican los PID, una de las válvulas controla el valor necesario para la temperatura interior, mientras que la otra controla el valor necesario para la humedad en el interior. El PLC de este sistema utiliza los valores óptimos de los parámetros del PID, estos se obtienen mediante el uso de conjuntos difusos, por tanto, es un control adaptativo difuso (FAC) que se ha utilizado con éxito para maximizar el rendimiento del sistema.

El diagrama de flujo que resume el programa se muestra en la figura 12.16.

En un apartado posterior se desarrollará la metodología de lógica difusa y su aplicación en el confort de edificios. Pero en la figura 12.17, se puede observar que a partir de la temperatura y la humedad relativa, se puede calcular el error respecto a un valor fijo y su variación, estos valores y obtener mediante la lógica difusa, el valor de  $\kappa_p$ ,  $\kappa_d$  y  $\kappa_i$ , con el cual obtener el valor del PID que regula cada dámper de un sistema.

Donde:

$e_n$  : Valor del error en el momento de la muestra n.

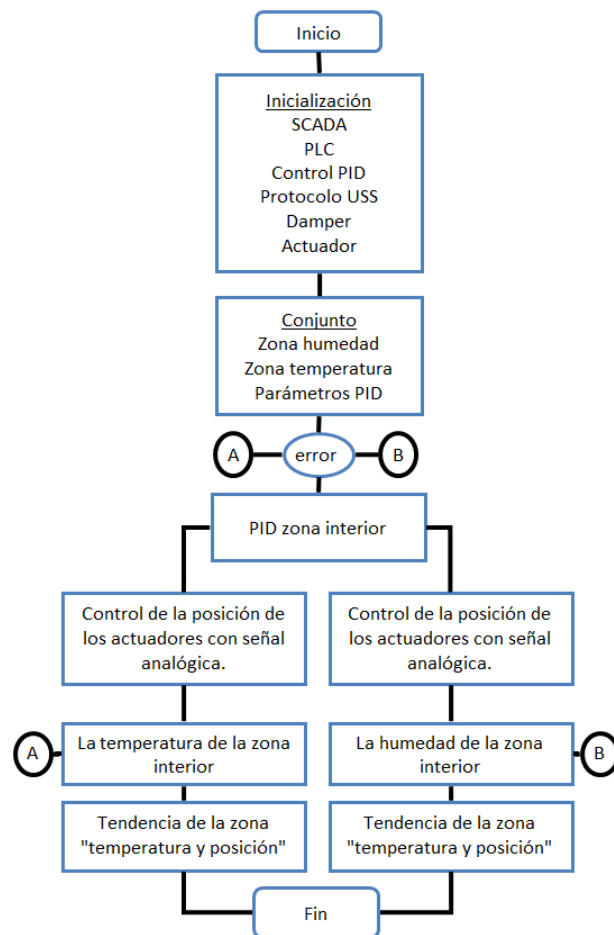
$e_{n-1}$  : Valor anterior del error.

$e_x$  : El valor del error en el momento de la muestra x.

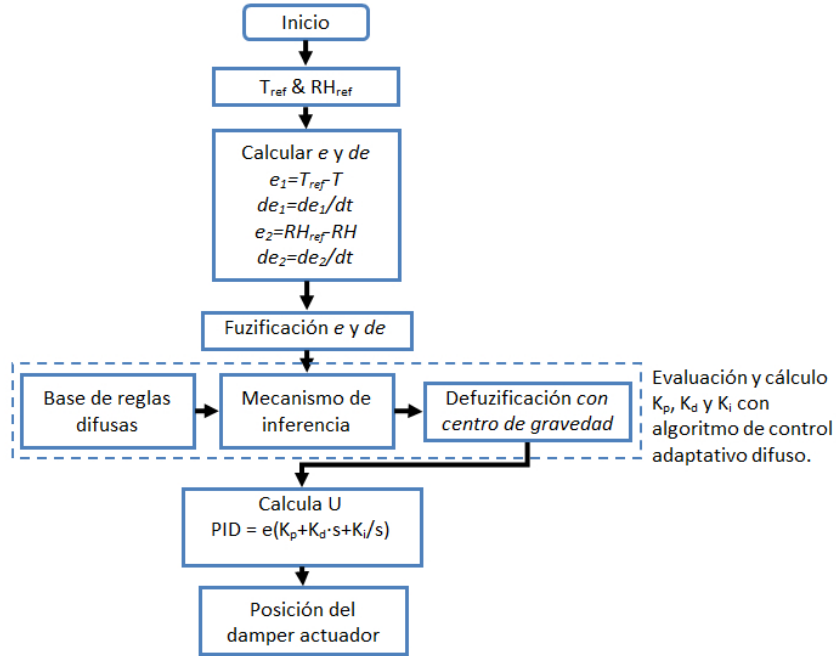
Se calcula el valor de salida para un momento n de tiempo de la siguiente manera:

## 12. HERRAMIENTAS

---



**Figura 12.16:** Diagrama de flujo de aplicación de un PID [Soyguder y Alli, 2009a].



**Figura 12.17:** Aplicación de un PID junto a la lógica difusa [Soyguder y Alli, 2009a].

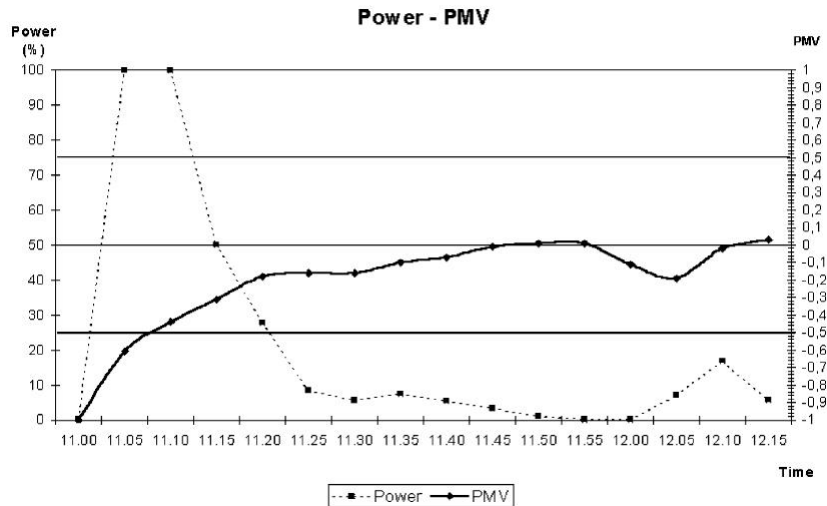
$$M_n = k_p^* e_n + k_i \sum_{1}^n e_x + M_{in} + k_d^* (e_n - e_{n-1}) \quad (12.6)$$

En [Calvino et al., 2004], esta ecuación se utiliza tras aplicar la transformada Z, se puede ver una variación de la ecuación donde  $U = K_p + K_i \cdot e + K_d \cdot \Delta e$  se utiliza para medir el error en el PMV de manera que se define el error como  $e(n) = PMV_{referencia} - PMV_{actual}$  y el  $\Delta e = e(n) - e(n-1) = -(PMV(n) - PMV(n-1))$ .

Los resultados de la investigación de este sistema, aplicado como herramienta para el control de un ambiente interior, fueron prometedores, puesto que se observó (ver figura 12.18) que la variación de energía respecto al nivel de confort era positiva, puesto que al principio el sistema trabaja al 100 %, pero en cuanto entra en la zona de confort aceptable, el sistema es capaz de mantener la temperatura en niveles admisibles, sin apenas gasto de energía, y además, en el estudio, se comprueba que si se realizan cambios ocasionales, como abrir una ventana (12h.) el sistema reacciona correctamente.

## 12. HERRAMIENTAS

---



**Figura 12.18:** Resultados Energía-PMV [Calvino et al., 2004].

Al igual que los trabajos expuestos, actualmente existe bastante literatura en la que se puede observar la aplicación del PID junto a otras técnicas [Argiriou et al., 2004], [Dalamagkidis et al., 2007], [Egilegor et al., 1997], [Kolokotsa, 2003], etc. Algunos de estos trabajos serán referenciados más adelante.

### 12.6.5 Conclusiones

Se ha observado que las herramientas mencionadas permiten realizar avances en el ahorro energético, pero todos estos estudios se basan en el PMV, siendo esta una limitación pues la respuesta al confort es muy generalista. En este sentido se abre una línea de investigación para la mejora y personalización del confort. El estudio de medidas que personalicen el confort permitiría la mejora en la calidad de éste, y también un mayor ahorro energético si se desarrollara un SE que obtuviera resultados óptimos de decisión en el mantenimiento de ambos objetivos. Además el desarrollo de un sistema central de climatización capaz de decidir temperaturas distintas según la situación de cada sala, junto a los avances estudiados y los desarrollados en este trabajo, podría ayudar a conseguir el objetivo deseado que permitiera desarrollar edificios verdaderamente inteligentes. Los cuales fueran capaces de usar eficientemente los recursos y proporcionar una respuesta rápida, altamente eficiente y generadora de un ambiente con un alto grado de confort.

*Las personas debemos el progreso a  
los insatisfechos*

Aldous Huxley

## CAPITULO 13

# BSA en estudios de confort

En el estudio del confort en edificios, como en otras áreas, se requieren las fórmulas más actuales y reales de la superficie corporal. En este campo de estudio, en términos de detalle anatómico sólo se necesita la altura y el peso, pero la zona del cuerpo puede ser diferente dependiendo de la fórmula utilizada. El área de superficie corporal (BSA, *Body Surface Area*) se ha utilizado para calcular el voto medio previsto (PMV) y el porcentaje de personas insatisfechas (PPD) para multitud de edificios. Además, es utilizada en algoritmos de confort y control en los sistemas HVAC. En este capítulo se calcula el BSA con diferentes fórmulas y se compara con el real que se utiliza en el PMV-PPD. Además, las ecuaciones alternativas son estudiadas, y cuáles deben ser las personas idóneas en los estudios de confort en los edificios.

### 13.1 Introducción

En el capítulo anterior se presentaron las escalas de sensación térmica PMV-PPD. El PMV se basa en el confort térmico, que se ve afectado por la conducción del calor por convección, radiación y la pérdida de calor por evaporación. El confort térmico se mantiene cuando el calor generado y disipado en el ser humano se mantiene en equilibrio térmico con el medio ambiente. La sensación de calor o frío no

### 13. BSA EN ESTUDIOS DE CONFORT

---

es sólo función de la temperatura del aire. El intercambio de calor requiere de la medición de los parámetros climáticos que afectan el equilibrio de calor humano como: la tasa metabólica, la resistencia térmica de la ropa, la temperatura del aire, la temperatura media radiante, la velocidad relativa del aire y la humedad relativa. Pero si se trata de estudiar el PMV de una manera personalizada, este índice variará ante las mismas condiciones dependiendo de la tasa metabólica aplicada, la ropa y la superficie del cuerpo con la cual se gana o se pierde el calor. Sin embargo, debido al nivel de actividad y las condiciones ambientales, las personas tienen diferentes tasas metabólicas.

A modo de resumen, las causas de estos desequilibrios en el confort son: por una parte, la pérdida de calor que se expresa en  $\frac{W}{m^2}$ , y representa la transferencia de calor entre la piel y el medio ambiente en función de la temperatura o presión de vapor, el área de superficie corporal y la resistencia del cuerpo a través de la ropa. La pérdida de calor por convección que ocurre cuando el aire más fresco que fluye a lo largo de la piel se lleva el calor del cuerpo. La pérdida de calor por radiación se produce cuando hay una diferencia entre la temperatura de la superficie del cuerpo y la temperatura de las superficies en el medio ambiente. Por último, el calor se pierde por evaporación a través de la humedad (sudor) en la piel. Las pérdidas por evaporación y convección también se producen en los pulmones durante la respiración. Por otro lado, la ganancia de calor del cuerpo se produce cuando la temperatura del aire, temperatura radiante, o presión de vapor alrededor del cuerpo es mayor que el valor de la piel, y esto puede dar lugar a estrés por calor.

El estándar ASHRAE 55 [Standard, 1992] define la tasa metabólica como el nivel de transformación de la energía química en calor y trabajo mecánico debido a actividades metabólicas dentro del organismo, generalmente se expresa en términos de unidad de área de la superficie corporal total. En el estándar, la tasa metabólica se expresa en la unidad MET, que se definen de la siguiente manera:  $1 MET = 58,2 \frac{W}{m^2}$ , es igual a la energía producida por unidad de superficie de una persona media sentada en reposo. El área superficial de una persona promedio es de  $1,8 m^2$ , pero esto puede variar según el país, la sociedad, o grupo de personas para las que se realiza el estudio, como en las escuelas, colegios, hospitales, etc., donde los grupos de personas son más específicos. Del mismo modo, si se estudia de forma personalizada, este valor también es útil.

**Tabla 13.1:** Valores medios de las tasas metabólicas en función de la actividad desarrollada (ISO 8996).

Clase	Tasa metabólica en $W/m^2$	Ejemplos de actividades
Descanso	65	Descansando, sentado cómodamente
Tasa metabólica baja	100	Escribir, teclear, dibujar, coser, anotar contabilidad, manejo de herramientas pequeñas, caminar sin prisa (velocidad hasta 2,5 Km/h)
Tasa metabólica moderada	165	clavar clavos, limar, conducción de camiones, tractores o máquinas de obras, caminar a una velocidad de 2,5 Km/h hasta 5,5 Km/h
Tasa metabólica alta	230	Trabajo intenso con brazos y tronco, transporte de materiales pesados, Pedalear, empleo de sierra, caminar a una velocidad de 5,5 Km/h hasta 7 Km/h
Tasa metabólica muy alta	260	Actividad muy intensa a ritmo de muy rápido a máximo, trabajo con hacha, cavado o pelado intenso, subir escaleras, caminar a una velocidad superior a 7 Km/h

El estándar [Standard, 1992] proporciona una tabla de niveles de actividad (un ejemplo de valores medios se presenta en la tabla 13.1). En la tabla, por cada actividad se presenta un valor único o un rango, es admisible utilizar una tasa metabólica media ponderada en el tiempo si las personas están realizando actividades que varían en un periodo de una hora o menos. Para períodos más largos deben ser considerados diferentes tasas metabólicas [Standard, 1992]. Por otra parte, los hábitos alimenticios y bebidas pueden tener una influencia en las tasas metabólicas, lo que influye indirectamente en las preferencias térmicas. Estos efectos pueden variar dependiendo de la ingesta de alimentos y bebidas. La forma del cuerpo es otro factor que influye en el confort térmico. La disipación del calor depende del área de superficie corporal. Una persona alta y delgada tiene una relación superficie-volumen más grande, y por tanto, puede disipar el calor con mayor facilidad, y puede tolerar temperaturas más altas que una persona con una forma de cuerpo redondeada [Sokolay, 2012].

En cuanto a la forma y la superficie del cuerpo, se ha observado que es un conjunto de datos relativamente importantes para el cálculo del PMV-PPD, por esta razón, este documento pone de relieve los actuales métodos de cálculo de la superficie del cuerpo, sus efectos sobre los índices PMV-PPD, y un estudio que identifica que características deben tener los grupos que se estudien respecto al

## 13. BSA EN ESTUDIOS DE CONFORT

---

confort.

Actualmente, hay investigaciones como [Dounis y Caraiscos, 2009], en las cuales se propone el uso de un supervisor inteligente que coordine controladores locales y el control total se logra cuando las preferencias de los ocupantes están satisfechas, basándose en el uso del PMV. Al igual que otras investigaciones [Moon y Kim, 2010], [Moon, 2012] o [Magnier y Haghighat, 2010] que también se basa en este indicador. En estos estudios, el área de superficie corporal debe ser tomada en cuenta.

### 13.2 Área de superficie corporal

En la actualidad, se requieren modelos de anatomía humana, no sólo en la moda. Un ejemplo es el proyecto “Sudoe Sizing project” (Europeo), que busca una base de datos antropométricos en 3D y cuyos datos no se conocerán hasta el año 2015. La antropometría juega un papel importante en el diseño de prendas de vestir, la ergonomía, el diseño industrial y la arquitectura. Sus datos se obtienen mediante estudios estadísticos sobre la distribución de las dimensiones corporales de la población a optimizar, calculado el área de superficie corporal (BSA). Pero no es fácil seleccionar los datos, debido a que los cambios en los estilos de vida, la nutrición y la composición étnica de la población llevan a los cambios en la distribución de las dimensiones del cuerpo, y requieren de la actualización periódica de las colecciones de datos antropométricos.

Hoy en día existen diferentes ecuaciones para calcular el BSA. La estructura general es una ecuación similar a  $BSA = a \cdot Altura^b \cdot Peso^c$  donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son coeficientes. Sin embargo, existen otras aproximaciones del BSA a las superficies geométricas, que utilizan sólo el peso para la estimación del BSA u otro tipo de fórmula. Las diferentes ecuaciones del BSA se presenta en la Tabla 13.2. La ecuación más antigua es DuBois [Du Bois y Du Bois, 1916], después [Boyd, 1935], [Gehan y George, 1970], [Haycock et al., 1978] y [Mosteller, 1987]. La ecuación DuBois se ha utilizado como fórmula estándar en algunos países. En los países orientales aparecieron otras ecuaciones, como las ecuaciones de [Fujimoto y Watanabe, 1969] en Japón.



## 13.2 Área de superficie corporal

El BSA es una medida útil, por esta razón, existen numerosas ecuaciones para su cálculo, algunas sobre la base de mediciones simples tales como la altura, peso, pecho o circunferencia abdominal, o alguna combinación de partes del cuerpo. Sin embargo, la ecuación más utilizada es la presentada por DuBois y DuBois. Ésta se basa en la medición directa del BSA de nueve pacientes, muchos de los cuales tenían deformidades esqueléticas [Wang et al., 1992]. Debido a que esta fórmula se deriva de un pequeño número de sujetos y se incluye sólo un niño, algunas investigaciones pusieron en duda la validez y exactitud de la fórmula. Sin embargo, DuBois y DuBois predicen correctamente en una amplia gama de alturas y pesos.

**Tabla 13.2:** Ecuaciones de BSA, donde H (cm.) es la altura y W (Kg.) es el peso del sujeto.

Autor	Año	Ecuación
<b>DuBois &amp; DuBois</b>	1916	$BSA = 0,20247 \cdot \frac{H}{100}^{0,725} \cdot W^{0,425}$
	1935	$BSA = 0,0003207 \cdot H^{0,3} \cdot 1000W^{0,7285-0,01881\log_{10}(1000W)}$
<b>Gehan &amp; George</b>	1970	$BSA = 0,0235 \cdot H^{0,42246} \cdot W^{0,51456}$
	1978	$BSA = 0,024265 \cdot H^{0,39646} \cdot W^{0,5378}$
<b>Haycock et al.</b>	1987	$BSA = \sqrt{\frac{H \cdot W}{3600}}$
<b>Mosteller</b>	1925	$BSA = 0,007241 \cdot H^{0,725} \cdot W^{0,425}$
<b>Takahira</b>	1968	$BSA = 0,008883 \cdot H^{0,663} \cdot W^{0,444}$
<b>Fujimoto</b>	1994	$BSA = 0,335 \cdot 0,02 \cdot W$
<b>Jones</b>	2001	$BSA_{men} = 128,1 \cdot H^{0,60} \cdot W^{0,44}$
<b>Tikuisis</b>		$BSA_{woman} = 147,4 \cdot H^{0,55} \cdot W^{0,47}$
<b>Chi-Yuang</b>	2003	$BSA = 0,015925 \cdot \sqrt{H \cdot W}$
<b>Chi-Yuang</b>	2010	$BSA = 71,3989 \cdot H^{0,3437} \cdot W^{0,4040}$

Es interesante destacar que casi todas las fórmulas están basadas en un bajo número de sujetos de estudio. En 1916, DuBois y DuBois propusieron una fórmula de estimación basado en nueve sujetos. Más tarde, en un enfoque similar, se han propuesto fórmulas basada en 197 sujetos, Boyd (1935), 201 sujetos, Fujimoto (1968), 401 sujetos, Gehan y George (1970), 81 sujetos, Haycock et al. (1978). Años más tarde, gracias al gran avance en la tecnología de escaneado 3D, el número de casos ha aumentado, los estudios de Yu Chi-Yuan et al. (2003) se realizaron

## 13. BSA EN ESTUDIOS DE CONFORT

---

sobre 3.951 sujetos y los de Tikuisis sobre 621 sujetos. Además, este último autor presenta diferentes ecuaciones en función de la edad y el género, como [Tikuisis et al., 2001] y [Yu et al., 2010]. Otros autores han publicado los datos de área de superficie corporal (BSA) para estudios con bebés y niños [Current, 1998] [Jones et al., 1994].

### 13.3 Escalas de la sensación térmica

En el capítulo 12 sección 12.5 se presentó la ecuación del PMV (ecuación 13.1) que se basa en el promedio de respuesta dada por un gran número de personas, ésta se expresa en términos del desequilibrio térmico y la actividad metabólica.

$$PMV = L \cdot [0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028] \quad (13.1)$$

Donde M representa el metabolismo del cuerpo humano relacionados con la actividad ( $W \cdot m^2$ ) y L representa la carga térmica del cuerpo humano como resultado de su equilibrio térmico con el medio ambiente ( $W \cdot m^2$ ). La carga térmica se define según la ecuación 13.2.

$$\begin{aligned} L &= (M - W) - (Q_{sk} + Q_{res}) \\ &= M - W - ((C_{sk} + R_{sk} + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res})) \end{aligned} \quad (13.2)$$

Donde:

M - es la tasa de producción de calor metabólico ( $\frac{W}{m^2}$  por área de superficie corporal)

W - es la tasa de trabajo mecánico

Q - es la pérdidas de calor (sk - Piel, res - Respiración)

C - es la pérdidas de calor por convección (sk - Piel, res - Respiración)

R - es la pérdidas de calor por radiación (sk - Piel)

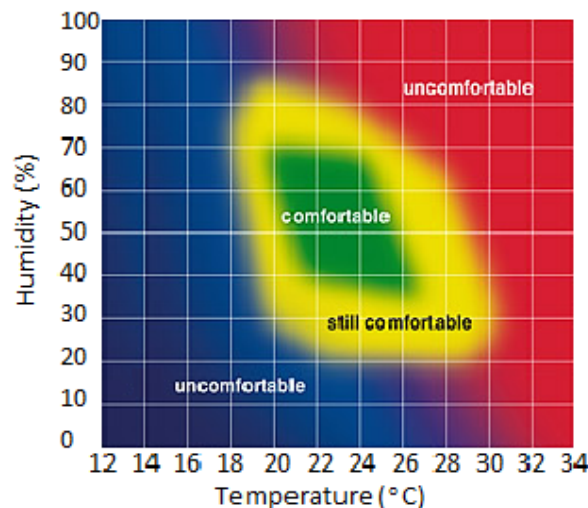
E - es la pérdidas de calor por evaporación (sk - Piel, res - Respiración)

Los parámetros y los límites para el cálculo del PMV, ya fueron presentados en la tabla 12.3, al igual que la ecuación para el cálculo del índice PPD.

## 13.4 Condiciones de estudio

En esta sección, se presenta la característica de los ejemplos de estudio. Se definen personas con tipo de actividad metabólica sedentaria (oficina, vivienda, escuela, laboratorio). Vestida con la ropa interior de manga corta, camisa, pantalones, chaqueta, calcetines y zapatos, respectivamente.

Las condiciones ambientales utilizadas se dividen en los siguientes cuatro casos. En cada caso se permite cambiar sólo dos variables ambientales, a fin de hacer una comparación entre la altura-peso y el PPD. La velocidad del aire es siempre 0,1 m/s. En la figura 13.1 se muestra la zona de confort en base a la humedad y la temperatura. Tres puntos son seleccionados en la zona de confort.



**Figura 13.1:** Zona de confort.

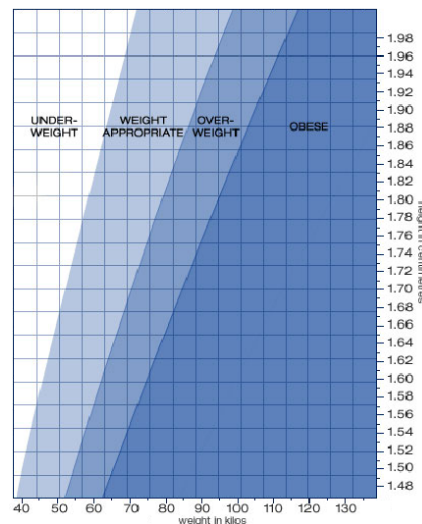
- Caso 1: Límite del confort con el disconfort por calor. La temperatura del aire y la temperatura media radiante son de 27 grados, y la humedad relativa se ha fijado en el 35 %.
- Caso 2: Confort. La temperatura del aire y la temperatura media radiante son de 24 grados y la humedad relativa se ha fijado en el 40 %.

### 13. BSA EN ESTUDIOS DE CONFORT

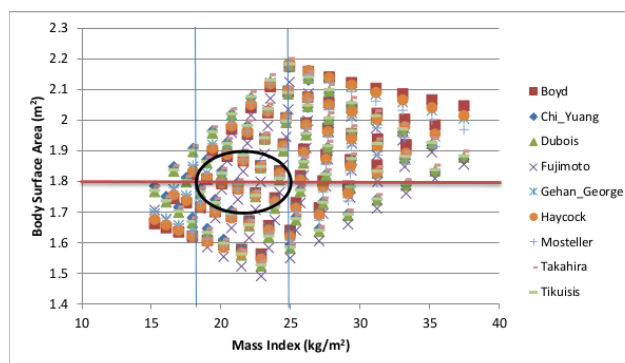
---

- Caso 3: Límite del confort con el disconfort por frío. La temperatura del aire y la temperatura media radiante son de 20 grados y la humedad relativa se ha fijado en el 70 %.

Para todos estos casos se simulan sujetos con diferentes pesos y alturas. En la figura 13.2 se muestran los tipos de sujetos en el estudio: entre 155 y 190 cm de altura y entre 55 y 90 kg. de peso. El área de superficie corporal y el índice de masa corporal se muestran en la figura 13.3. En la figura, la línea roja representa el área de superficie del cuerpo que se utiliza convencionalmente ( $1,8 m^2$ ). A través de la figura y usuarios se puede categorizar como: bajo peso, peso adecuado, sobrepeso y obesidad.



**Figura 13.2:** Índice de masa basado en la Organización Mundial de la Salud.



**Figura 13.3:** Área de superficie corporal e índice de masa corporal para los sujetos de estudio.

## 13.5 Resultados

Los resultados del estudio (Figuras 13.4 y 13.5) demuestran cómo afecta de diferente forma el uso de la ecuación de cálculo de una superficie del cuerpo en el PMV y por lo tanto el PPD. Para las personas con peso apropiado para su altura y dentro de la zona de confort, la diferencia en porcentaje entre las diferentes ecuaciones son menores de 5 %, aunque fuera de la zona de confort puede haber diferencias de hasta el 15 %. Obviamente, para el caso 1, las personas con mayor superficie se ven más afectadas por el malestar, a pesar de tener un peso adecuado a su altura, la evaporación del sudor tiene un mayor efecto en ellos. Sin embargo, el caso 3 se invierte, con un peso más bajo, más frío. Esto debe ser tenido en cuenta como una distinción en los estudios de confort en el entorno escolar, o en los edificios para las personas físicas especiales.

Los cálculos BSA utilizando la ecuación de Dubois, Chi-Yuang y Takahira resultaron similares. La ecuación de Fujimoto fue aproximadamente un 3 % más baja que el resto. Pero el efecto del PMV y PPD es significativo, en el límite del confort es de hasta el 5 %. En comparación con la ecuación de Fujimoto, Boyd, Gehan-George, Haycock y Mosteller tienen una tendencia a sobreestimar (sobrepeso) el BSA de los seres humanos bajos y con obesidad, y a subestimar a los altos y delgados (bajo peso).

Esta discrepancia entre la fórmula de DuBois y Chi-Yuang era más pequeña que las discrepancias existentes entre el resto de fórmulas y la fórmula de DuBois.

### 13. BSA EN ESTUDIOS DE CONFORT

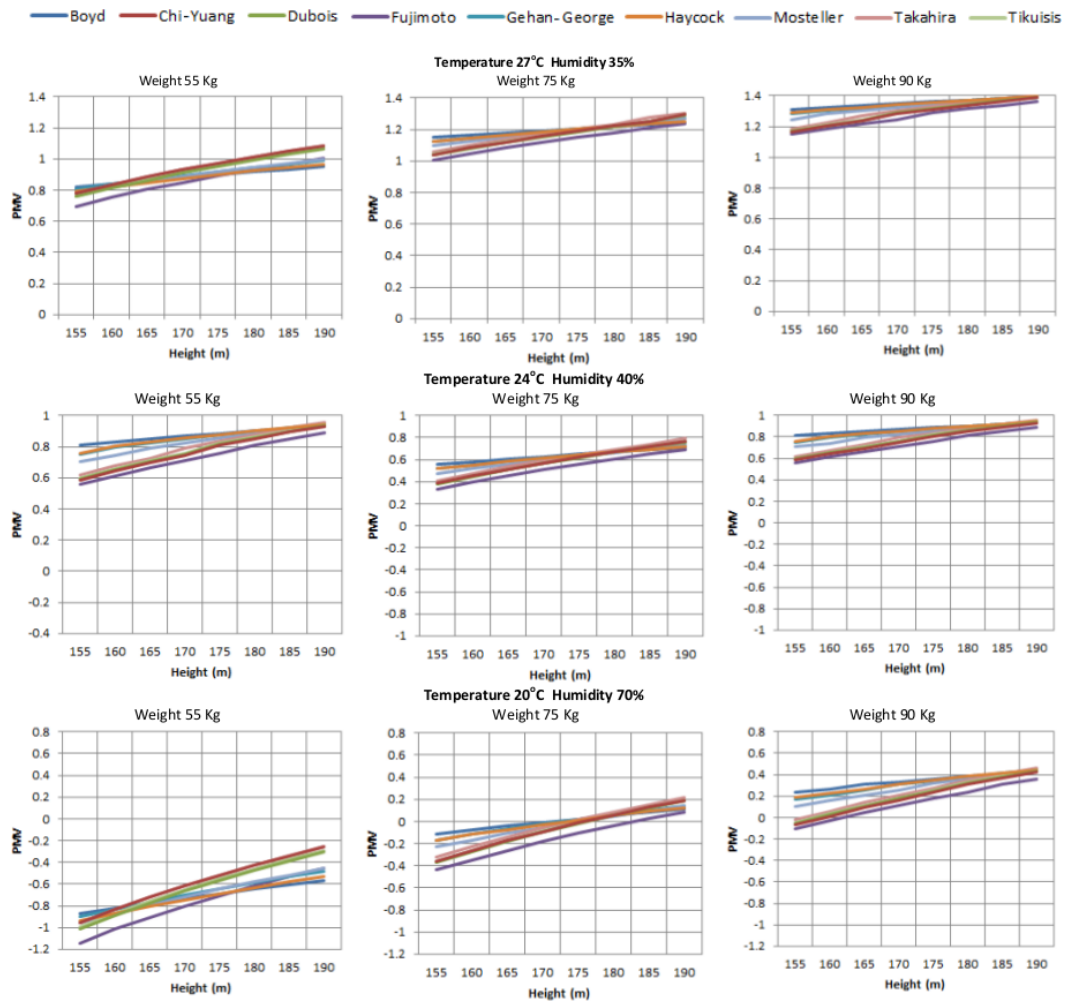


Figura 13.4: Efecto de la variación de la altura.

## 13.5 Resultados

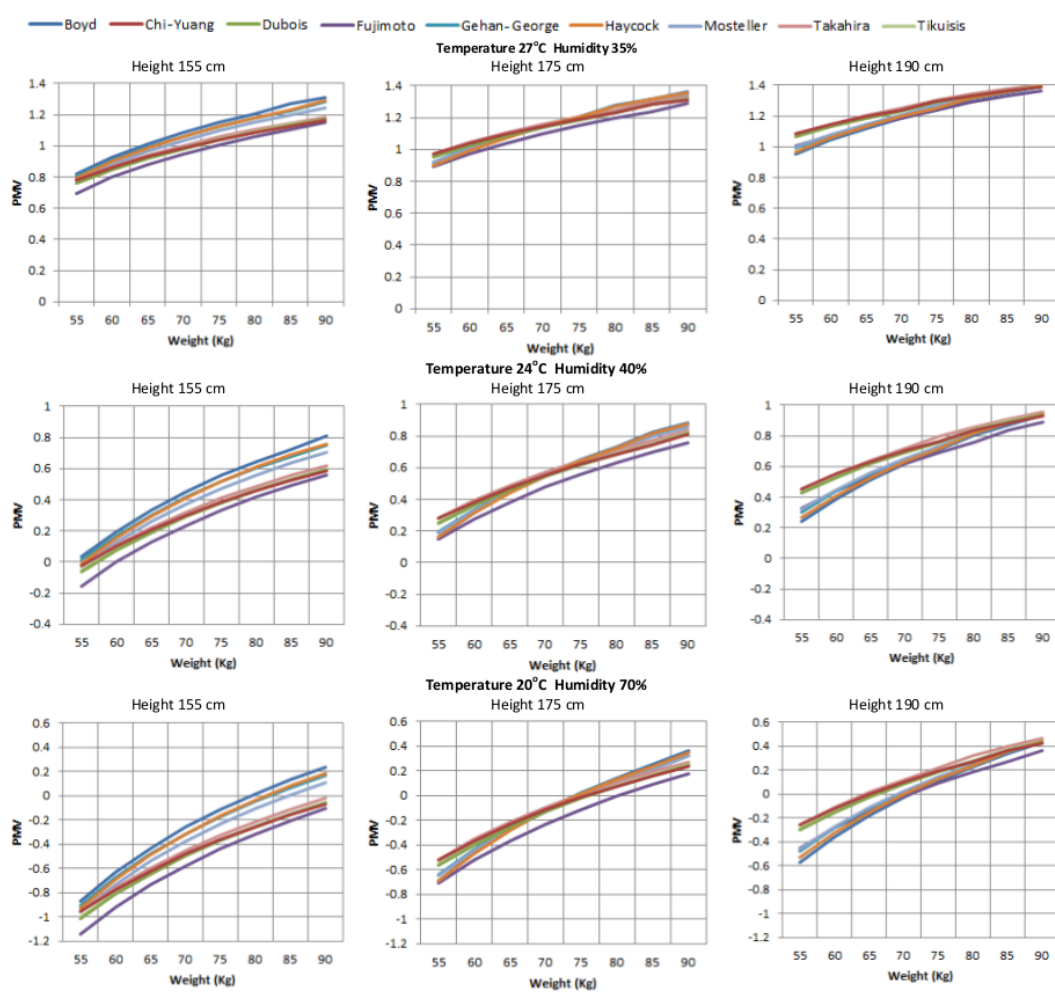


Figura 13.5: Efecto de la variación del peso.

## 13. BSA EN ESTUDIOS DE CONFORT

---

Por último, en la figura 13.3, se ha marcado el área de superficie corporal generalmente aplicado en el PMV,  $1,8 \text{ m}^2$  (línea roja). Sin embargo, se ha observado que la mejor población de estudio es una población ideal con un índice de masa corporal dentro del rango de  $[18,5 - 25] \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$  (líneas azules), es decir, el entorno marcado por una elipse negra.

### 13.6 Conclusiones

En la actualidad, muchos investigadores están utilizando el PMV para desarrollar algoritmos de control en los sistemas HVAC. Sin embargo, es necesario definir las variables asociadas con la superficie de los cuerpos de los usuarios de estos sistemas. Se observó que en los límites de la comodidad, hay cambios significativos en el número de personas insatisfechas, esta variable podría afectar a estos sistemas o sus estudios. Del mismo modo, los estudios de los edificios deben tener en cuenta las distintas complexiones físicas de cada estudio de población o país, con especial atención a los niños. Como se ha observado en este estudio, los escáneres 3D pueden proporcionar ecuaciones nuevas y modernas, como en el caso de Chi-Huang o Takahira, que puede sustituir a la ecuación que Dubois presentó en 1916 sobre la base de un estudio de nueve personas. Sin embargo, se espera que proyectos como “Sudoe Sizing project” proporcionen una ecuación para países de la UE. Esta nueva ecuación sería más generalmente aplicada con éxito al estudio de confort térmico en la Unión Europea después de 2015.



*La técnica es el esfuerzo para ahorrar esfuerzo.*

José Ortega y Gasset

# CAPITULO 14

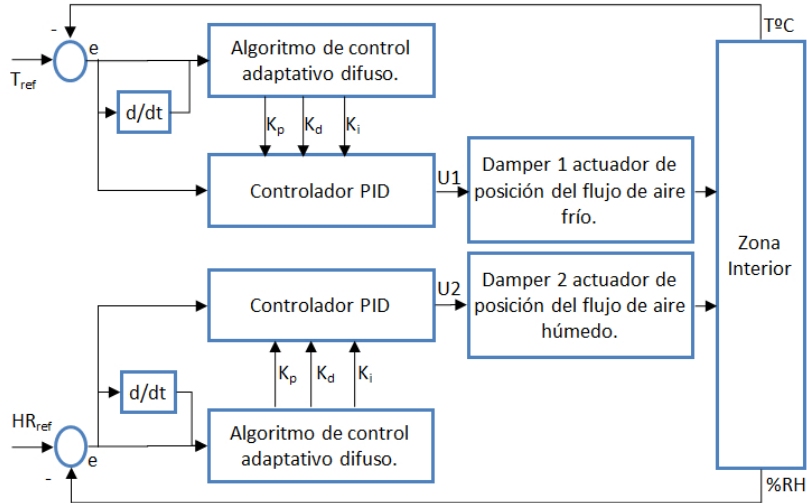
## Técnicas aplicadas a la mejora del confort climático

Para lograr edificios energéticamente sostenibles e inteligentes, que permitan la eficiencia económica y climática en su funcionamiento, se han aplicado diversas técnicas presentadas con anterioridad en el estado del arte. En este capítulo, se presentan algunas de las técnicas aplicadas por la comunidad científica a los sistemas de climatización.

### 14.1 Lógica Difusa

Las técnicas presentadas en el estado del arte se han empleado en multitud de ocasiones en combinación con otras. El caso de la lógica difusa no es una excepción, muestra de ello son los sistemas expertos de Soyguder et al. [Soyguder y Alli, 2009a], [Soyguder et al., 2009], [Soyguder y Alli, 2009b], [Soyguder y Alli, 2010] y [Soyguder, 2011] referenciados con anterioridad por su aplicación del PID. En la figura 14.1, se muestra el diagrama de flujo de un SE que controla un HVAC mediante un algoritmo de control adaptativo difuso. La lógica difusa es aplicada en este sistema para obtener el óptimo  $k_p - k_i - k_d$  para un actuador, o controlador PID, que es utilizado para controlar la humedad y la temperatura.

## 14. TÉCNICAS APLICADAS A LA MEJORA DEL CONFORT CLIMÁTICO

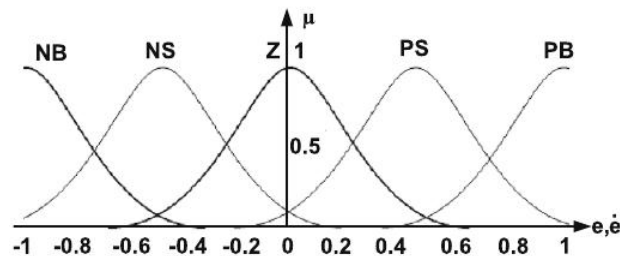


**Figura 14.1:** PID y lógica difusa [Soyguder y Alli, 2010].

Igualmente, en la bibliografía anterior del autor se encuentra el mismo esquema aplicado a varias zonas, pero únicamente para la temperatura. Los resultados y la respuesta del sistema, puede verse en la figura 14.5. Los parámetros obtenidos  $k_p - k_i - k_d$  necesarios para el cálculo del PID se utilizan en tiempo real, y el controlador maximiza el rendimiento del sistema.

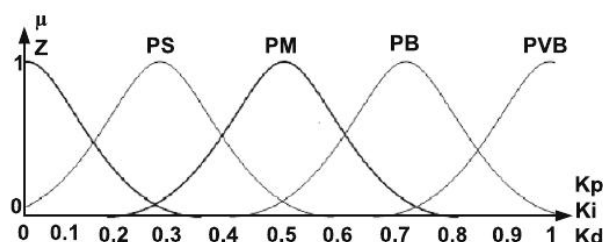
El algoritmo de control adaptativo difuso conoce la relación difusa entre los tres parámetros del PID, el error ( $e$ ) y la variación del error ( $\bar{e}$ ).

En el sistema se examinan sin cesar el  $e$  y  $\bar{e}$ . Y estos valores son los encargados de controlar los tres parámetros ( $k_p - k_i - k_d$ ) mediante reglas de control difuso que controlan el sistema. Para ello se usan las funciones de pertenencia de gauss que se presentan en la figura 14.2.



**Figura 14.2:** Función de pertenencia de entrada para  $e$  y  $\bar{e}$  [Soyguder y Alli, 2010].

Donde las funciones de pertenencia de estrada se definen para  $e$  (error) y para  $\bar{e}$  (variación del error) como NB (Negativo Grande), NS (Negativo Pequeño), Z (Cero), PS (Positivo Pequeño), PB (Positivo Grande).



**Figura 14.3:** Función de pertenencia de salida para  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$  [Soyguder y Alli, 2010].

Las funciones de pertenencia de  $k_p$ ,  $k_d$  y  $k_i$  (Parámetros de control) se definen como Z (Cero), PS (Positivo Pequeño), PM (Positivo Mediano), PB (Positivo Grande), PVB (Positivo Muy Grande).

El conjunto de funciones de permanencia se basa en un conjunto de reglas de control definidas en la figura 14.4.

Experimentando con el sistema los autores comprueban que estos sistemas obtienen los parámetros de control (temperatura y humedad) en tiempo real.

Los resultados de investigación presentados por [Soyguder y Alli, 2010], muestran un sistema que permite que la temperatura permanezca constante tres cuartas partes del día. En el estudio, se quiere ajustar la temperatura de un ambiente de

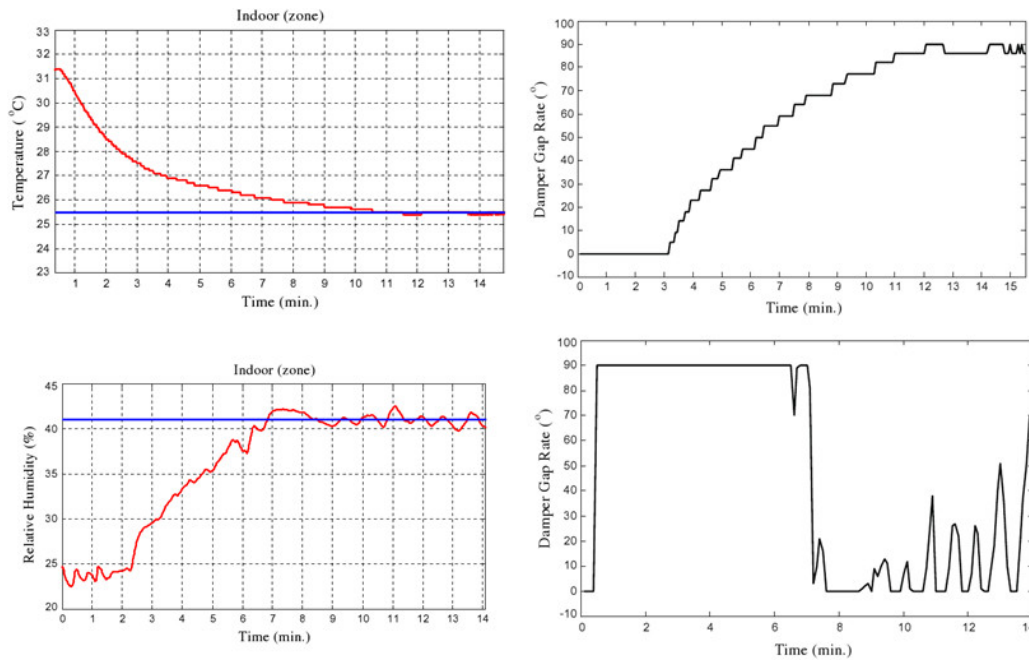
		$\bar{e}$					
		(Kp)	NB	NS	Z	PS	PB
e	NB	PVB	PVB	PVB	PB	PM	
	NS	PVB	PVB	PB	PB	PM	
	Z	PB	PB	PM	PS	PS	
	PS	PM	PS	PS	PS	PS	
	PB	PS	PS	Z	Z	Z	
		Tref<0					
		(Kd)	NB	NS	Z	PS	PB
e	NB	Z	Z	PS	PS	PB	
	NS	Z	Z	Z	Z	PS	
	Z	Z	Z	Z	PS	PB	
	PS	PS	PS	PS	PB	Z	
	PB	Z	Z	Z	PS	PB	
		Tref<0					
		(Ki)	NB	NS	Z	PS	PB
e	NB	PVB	PB	PM	PM	PM	
	NS	PVB	PB	PB	PM	PS	
	Z	PM	PS	Z	Z	Z	
	PS	PM	PM	PS	Z	Z	
	PB	PS	Z	Z	Z	Z	
		Tref<0					

**Figura 14.4:** Reglas de control [Soyguder y Alli, 2010].

## 14. TÉCNICAS APLICADAS A LA MEJORA DEL CONFORT CLIMÁTICO

---

aproximadamente  $31,4^{\circ}C$  a una temperatura interior de  $25,5^{\circ}C$ . La humedad relativa de aproximadamente el 24 %, se quiere aproximar a un valor de humedad relativa interior del 41 %.



**Figura 14.5:** Acercamiento a valores exactos de los parámetros.

Las gráficas de la figura 14.5 muestran como la adecuada selección de los parámetros consigue una rápida disminución de la temperatura, un acercamiento más lento al valor exacto, y por último el mantenimiento de los errores de temperatura en el estado estacionario. Además, el estudio muestra que el uso de la variación de la humedad absorbe  $5^{\circ}C$  de la temperatura interior.

En [Shahnawaz Ahmed et al., 2007], se encuentra otro sistema que aplica lógica difusa, en este caso, se trata de habitaciones atendidas por un aire acondicionado central, este trabajo, también pretende una reducción en el consumo de energía eléctrica. En él, las capturas del sensor de temperatura y humedad se comparan con los objetivos fijados en un conjunto de intervalos de tiempo seleccionados. Con las diferencias correspondientes, se obtiene la variación necesaria en la configuración del termostato. Para decidir el cambio se aplica una función de inferencia de lógica difusa, se emplea la lógica debido a que el paso de encendido a apagado es muy

costoso, y estos termostatos trabajan con una banda de error de  $1,5^{\circ}C$  aproximadamente.

Con respecto al SE anterior, hay que tener en cuenta que la aplicación de un HVAC centralizado, supone una dificultad añadida, puesto que hay que mantener la temperatura de varias habitaciones a la vez y el estado de confort de estas depende de muchos factores, entre ellos: las dimensiones físicas de la habitación, la calidad del aire, la orientación de esta en el edificio, el número de personas que las ocupan, etc.

Según [Shahnawaz Ahmed et al., 2007], los puntos importantes a considerar en el diseño de este tipo de SE, son:

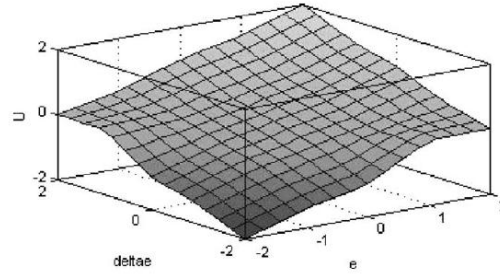
1. La cuantificación de la diferencia de temperatura y humedad respecto de los objetivos de cada habitación.
2. La estructuración del sistema convencional de HVAC para permitir que se controle la humedad denegando a los usuarios la posibilidad de modificarla.
3. La observación del sistema y sus variaciones en cada día y periodos, lo cual no supone garantizar el bienestar y ahorro energético respecto a cada sala.
4. Estudiar la frecuencia con la cual se debe comparar el estado actual que se tiene como objetivo.

El resultado del experimento de Shahnawaz, realizado en un clima tropical de Malasia, permitía mantener una temperatura aproximada de  $25^{\circ}C$  y una humedad relativa del 70 %, además, de lograr un importante ahorro de energía mientras el compresor permanecía apagado.

Las ventajas del sistema que propuso para la programación de un termostato con sistema central de aire acondicionado son:

1. Para cada habitación se requiere sólo un par de datos de entrada, dados por el sensor de temperatura y el de humedad de cada habitación.
2. Los controles de humedad se realizan de manera indirecta.

## 14. TÉCNICAS APLICADAS A LA MEJORA DEL CONFORT CLIMÁTICO



**Figura 14.6:** Representación gráfica de las reglas lógicas.

**Tabla 14.1:** Reglas de control del PMV.

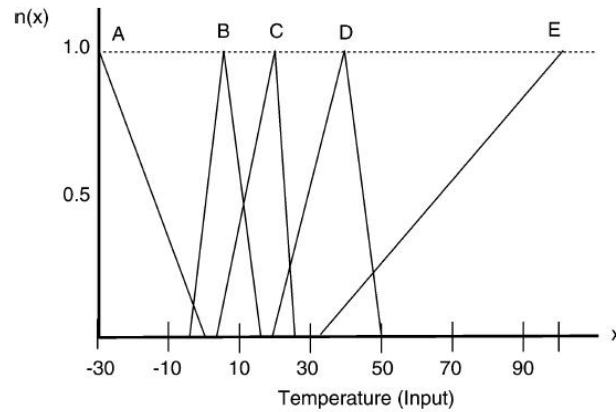
e	$\Delta e$				
	-2	-1	0	1	2
-2	-2	-1.4	-1	-0.6	0
-1	-1.4	-0.8	-0.4	0	0.4
0	-1	-0.4	0	0.4	1
1	-0.6	0	0.4	0.8	1.4
2	0	0.4	1	1.4	2

3. El sistema permite un ahorro en el consumo de energía, manteniendo un nivel adecuado de refrigeración en cada una de las habitaciones aunque su ocupación, el tamaño y las condiciones térmicas son diferentes unas de otras.

En [Calvino et al., 2004], se trabaja en cambio con el PMV y se define el PID como la ecuación donde  $U = K_p + K_i \cdot e + K_d \cdot \Delta e$ , y se utiliza el PMV para medir el error de manera que se define el error como  $e(n) = PMV_{referencia} - PMV_{actual}$  y el  $\Delta e = e(n) - e(n-1) = -(PMV(n) - PMV(n-1))$  y se obtienen las reglas lógicas presentes en la figura 14.6 y tabla 14.1.

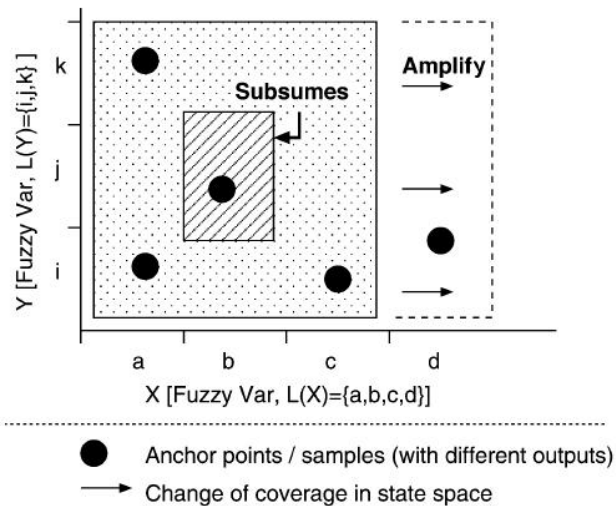
En [Rutishauser et al., 2005], sólo se utilizan variables difusas para calcular su salida (inferencia). Todos los datos de entrada de valor real son primero fusificados con funciones de pertenencia definidas estáticamente (ejemplo: figura 14.7).

Para este sistema, se especificaron de forma manual cada tipo de dato de entrada. Las funciones estaban preestablecidas por lo que no existió aprendizaje. Las funciones de pertenencia incorporaban los conocimientos de dominio implícito. Para otro tipo de reglas dinámicas, si se aplica un algoritmo de aprendizaje basa-



**Figura 14.7:** Ejemplo de etiquetas asociadas a las variables difusas de temperatura [Rutishauser et al., 2005].

do en dos operadores que amplifican y subsumen las reglas del tipo “si X es A y Y es B entonces Z es C”, donde el efecto de los operadores de amplificación, es la incorporación del espacio de los estados difusos, es decir, se añaden condiciones adicionales a los antecedentes de una regla. Una regla subsume a otra cuando existen otras reglas que tienen la misma salida o contradicen a otra regla (valores contradictorios de salida), en la figura 14.8 se muestra un ejemplo.



**Figura 14.8:** Efectos de los operadores amplificar y subsumir mostrados en dos dimensiones de espacio difuso [Rutishauser et al., 2005].

## 14. TÉCNICAS APLICADAS A LA MEJORA DEL CONFORT CLIMÁTICO

---

Ejemplos como el anterior muestran las posibilidades de aplicación de esta metodología, donde es posible modificar las leyes para generar aprendizaje en las reglas, o simplemente utilizar la metodología, como en apartados anteriores, en este sólo se han mostrado algunos ejemplos que usan la lógica difusa, pero existen diversas aplicaciones que emplean la lógica difusa en combinación con otras metodologías: [Dalamagkidis et al., 2007], [Doctor et al., 2005], [Dounis y Manolakis, 2001], [Dounis y Caraiscos, 2007], [Dounis y Caraiscos, 2008], [Egilegor et al., 1997], [Guillemin y Molteni, 2002], [Hagras et al., 2003], [Hagras et al., 2004], [Hamdi y Lachiver, 1998], [Homod et al., 2012], [Kolokotsa et al., 2001], [Kolokotsa et al., 2002], [Kolokotsa, 2003], [Liang y Du, 2005], [Liang y Du, 2008], [Morel et al., 2001], [Shepherd y Batty, 2003], [Tripolitakis et al., 2004] o [Yamada et al., 1999].

### 14.2 Redes Neuronales

Las redes neuronales artificiales son ampliamente utilizadas en los procesos de gestión de la energía. En la literatura se observa su utilidad en la optimización de la demanda energética de los edificios. En [Argiriou et al., 2000], se recalca que los cambios en las condiciones climáticas pueden acarrear ahorros de energía mientras se mantiene el confort térmico. Para ello, Argiriou propone un controlador mediante redes neuronales compuesto por un módulo meteorológico que aporta información de la previsión de temperatura ambiente y la radiación solar. Un módulo de energía del interruptor de calefacción predice la temperatura interior. El controlador se probó experimentalmente en un entorno de simulación de un edificio, éste generó un ahorro anual del 7,5 % de energía. En el estudio, la toma de datos del experimento se realizaba cada 15 min.

El modulo que realiza la predicción del tiempo, aplica una red neuronal simple que cuenta con 10 neuronas de entrada: el valor del tiempo en los próximos intervalos, cuatro valores anteriores de tiempo, el número del día del próximo intervalo y los tres últimos valores de la energía-radiación solar. El resto de la red la conforman dos capas ocultas de ocho y cuatro neuronas y una neurona de salida. En la investigación de Arguiour, se modificó la red neuronal a una estructura más grande, los resultados demostraron que la aplicación de redes neuronales se puede



utilizar para mejorar el control del sistema de calefacción en las casas. El desarrollo de sistemas de bajo coste provoca que sea necesario realizar sistemas con el número mínimo de parámetros de entrada. El ahorro de estos sistemas puede ser significativo, esto se debe a las capacidades de predicción de las redes neuronales, que relacionan tanto los parámetros de tiempo como el comportamiento térmico del edificio, esto permite el cierre del sistema de calefacción antes del período real de sobrecalentamiento que se produce en los edificios actuales.

La adaptabilidad de los modelos de RNA a través de procesos de auto-ajuste es diferente de los modelos matemáticos, como los modelos de regresión o PID, debido a que la toma de decisiones se realiza sin la posible intervención del experto cuando se producen inusuales perturbaciones o cambios en las condiciones del edificio.

En algunos estudios, los modelos de RNA se aplicaron para determinar el inicio y finalización óptimo en los sistemas de calefacción, esto permitía que se volviera a establecer la temperatura del aire interior para cierto nivel de confort, aunque los estudios generalmente se aplican dentro del rango de confort establecido en  $18 - 24^{\circ}\text{C}$  [Yang et al., 2003a] [Argiriou et al., 2000]. Un estudio similar mediante RNA fue empleado por [Argiriou et al., 2004], para predecir el final del momento de retroceso en un sistema de control predictivo de un HVAC.

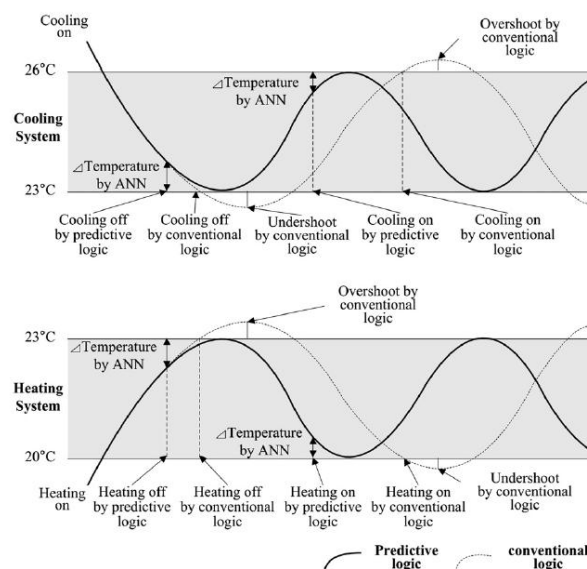
Otros modelos, dan un paso más a nivel de confort al tener en cuenta el PMV, este es el caso de [Moon y Kim, 2010], su trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una avanzada estrategia residencial de control térmico para la creación de condiciones térmicas más confortables. El sistema desarrollado por Moon y Kim está dirigido al control de la temperatura del aire, humedad y PMV. Se basan en información del exterior e interior y utiliza una red de sensores y dispositivos de control climático. La lógica de control de Moon y Kim consta de cinco pasos:

1. Estudio de las condiciones físicas: climáticas (temperatura, humedad, velocidad del aire) exteriores e interiores y personales (ropa, actividad).
2. Estudio del confort térmico: el rango recomendado, el rango de operación con el conjunto de usuarios (PMV) y el rendimiento adecuado para encender o apagar los dispositivos de control de origen climático.

## 14. TÉCNICAS APLICADAS A LA MEJORA DEL CONFORT CLIMÁTICO

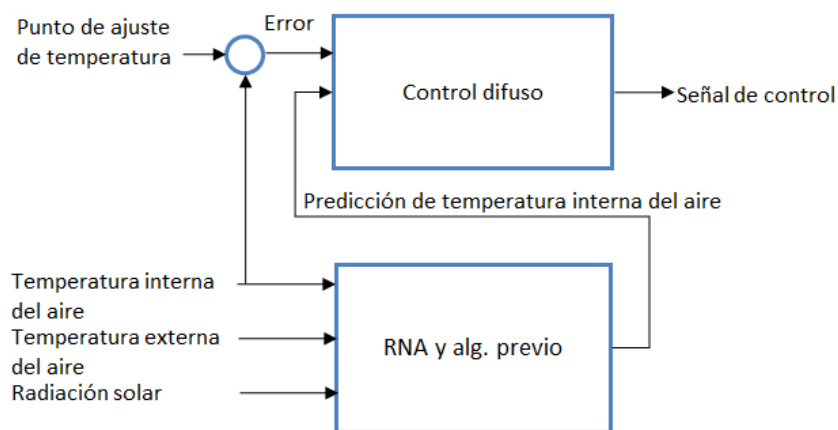
3. Estudio de energía: los usuarios establecen un valor de retroceso y período. Cierta lógica recomienda como reducir el consumo de energía.
4. Decisión del sistema: el funcionamiento óptimo del dispositivo de control se determina en función del algoritmo de control que utiliza la información climática actual y pasada, las condiciones personales, los rangos de funcionamiento y retroceso, etc. Para ello se aplica un algoritmo de RNA.
5. Dispositivos de control: HVAC y otros dispositivos.

Con el fin de alcanzar dicho objetivo Moon y Kim desarrollaron el sistema de control (lógica) y un hardware, en el cuarto paso utilizaron la predicción mediante RNA. En la figura 14.9 se observa la reacción de la lógica convencional frente a la predictiva dada por la RNA. Como el resto de autores mencionados en este apartado, Moon y Kim utilizan una red neuronal multicapa, en este caso con ocho entradas (temperatura y humedad, tanto exterior como interior, y su variación), diecisiete neuronas en la capa oculta y una neurona de salida que indica la variación de temperatura necesaria.



**Figura 14.9:** Comparativa de temperatura entre un sistema convencional y un sistema predictivo [Moon y Kim, 2010].

La lógica de control predictivo basada en RNA que controlan la temperatura y la humedad ha demostrado en el caso de Moon y Kim que los sistemas pueden predecir la temperatura y humedad interior con una gran precisión. Pero no todos los estudios se basan en el estudio de la temperatura y humedad asociada a las salas, otros trabajos como [Yalcintas y Akkurt, 2005] aplican las redes neuronales a la predicción de consumo energético del sistema basándose en datos climáticos exteriores, este trabajo es un ejemplo de uso del perceptrón multicapa con retropropagación en el que se aplica una función sigmoide. En [Gouda et al., 2006], también se aplican las redes neuronales para la predicción de la temperatura interna, pero los autores desarrollan una aplicación que usa esta información junto a la lógica difusa (que se verá más adelante) para controlar la señal que decide la temperatura del sistema HVAC. El objetivo principal del trabajo de Gouda es reducir el efecto de sobrecalentamiento causado por la energía solar pasiva, es decir, la ganancia de calor de un espacio causada por la radiación solar que se aprecia por la ventana, para ello utiliza un mecanismo de adaptación o controlador a partir de una RNA que predice la temperatura una hora antes y la predicción de este modo forma una de las dos entradas de un sistema de automatización difuso que controla el sistema. De esta forma se reducen la demanda de temperatura de las salas.



**Figura 14.10:** Sistema de Gouda [Gouda et al., 2006].

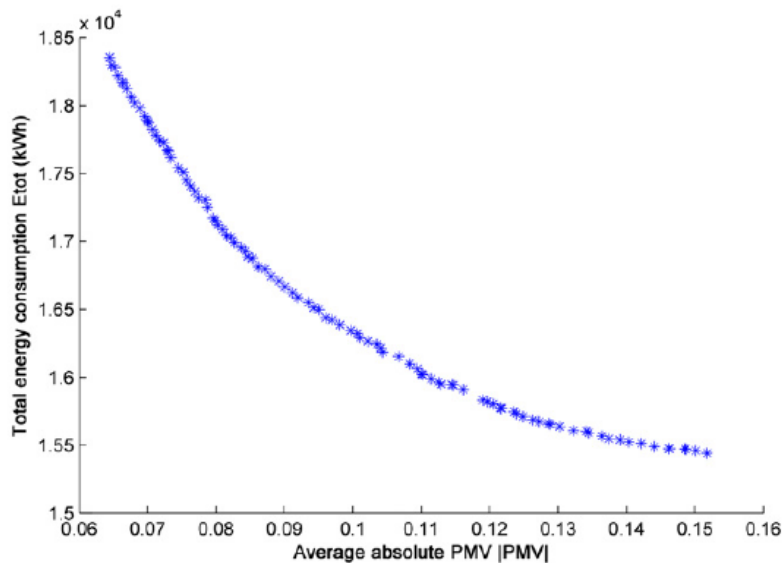
Como se ha podido observar en este apartado existen múltiples aplicaciones de las redes neuronales en este campo por su capacidad predictiva tras su entrenamiento.

## 14. TÉCNICAS APLICADAS A LA MEJORA DEL CONFORT CLIMÁTICO

---

### 14.3 Algoritmos genéticos

En [Magnier y Haghighat, 2010], se puede encontrar un SE en el que se desean optimizar dos objetivos: eficiencia energética y confort termal (basado en el PMV). Para ello se utiliza un algoritmo genético multi-objetivo, fundamentado en variables derivadas de factores de construcción, como son el tamaño de las ventanas, el diseño energético, la masa técnica de aire y variables relacionadas con el sistema HVAC. En éstas últimas, se tiene en cuenta la temperatura para la calefacción y aire acondicionado, la humedad relativa, la variación en el suministro de aire, los modos de recirculación de aire, los retrasos del termostato y la asignación de valores antes y después de la ocupación de la sala. Además en este trabajo se puede encontrar la aplicación de una RNA con 20 neuronas de entrada y 5 de salida (PMV, grado de desacuerdo, energía consumida por el ventilador, la calefacción y el aire acondicionado).



**Figura 14.11:** Consumos de energía respecto del PMV [Magnier y Haghighat, 2010].

En los resultados del sistema de Magnier y Haghighat, figura 14.11, se observa la relación de la energía consumida y el PMV, y como para valores inferiores a 0,11 en el PMV, la variación de energía es muy alta, y para valores mayores de PMV, en

cambio hay poca variación, por lo que sería convincente mantener un PMV de 0,11 respecto a 0,08, ya que esto supone un ahorro del 13 % de energía.

En [Wright et al., 2002], se presentan los resultados de una investigación en la que se aplica un algoritmo genético simple, aunque este no se detalla. El algoritmo tiene como finalidad ayudar a realizar una optimización multi-criterio. El sistema trabaja con dos controladores, uno de temperatura del aire, otro de tasa de flujo de aire y un supervisor de control determina si un dispositivo de recuperación de calor debe estar en funcionamiento o si la calefacción-refrigeración debe estar activa para cumplir con las necesidades. Este estudio se limita a la investigación de la amortización entre el coste de energía del sistema HVAC y la comodidad térmica de los ocupantes mediante el estudio del PPD.

En esta técnica al igual que en anteriores, se ha observado que se puede encontrar literatura referida a su aplicación en HVAC. Además de las investigaciones mencionadas, existen otros ejemplos no mencionados en este apartado, son los trabajos de [Wang y Jin, 2000], [Nassif et al., 2004] o [Huang y Lam, 1997].

## 14.4 Sistemas multi-agentes

Los agentes y sistemas multiagente son ampliamente utilizados debido a su capacidad para gestionar tareas complejas y sistemas, de manera autónoma e inteligente.

Actualmente se observa un creciente interés por la investigación sobre sistemas multi-agentes de control. Existen trabajos, como el de [Davidsson y Boman, 2005] que tienen como objetivo el ahorro de energía y el aumento de la satisfacción del cliente. Generalmente el ahorro de energía se realiza, por ejemplo, mediante luces que se apagan automáticamente, o ahorro en la temperatura ambiente cuando las habitaciones están vacías. Mientras que la mejora en la satisfacción del cliente se realiza, por ejemplo, mediante la adaptación de la temperatura y la intensidad de luz de acuerdo a las preferencias de cada persona. Sin embargo, las preferencias personales predefinidas son estáticas porque no se ajustan de acuerdo al comportamiento o comentarios de los ocupantes. Por otra parte, esta investigación carece de la capacidad de aprendizaje o de predicción sobre el comportamiento de los ocupantes.

## 14. TÉCNICAS APLICADAS A LA MEJORA DEL CONFORT CLIMÁTICO

---

Un avance respecto de este trabajo, fue MASBO, un trabajo realizado por [Duangsuwan y Liu, 2008] que desarrollaron una arquitectura MAS colaborativa compuesta por tres tipos de agentes:

- Los agentes personales asociados a los usuarios, es decir, los ocupantes en una zona determinada.
- Los agentes locales y de control que corresponden a una zona determinada.
- Agentes centrales que tienen dos funciones principales: la agregación de decisiones y la interfaz de servicios internos y externos requeridos por los agentes locales.

Su estudio asigna el control y el aprendizaje de edificios inteligentes a los agentes. A éstos les corresponde la toma de decisiones sobre el estado de todos los actuadores del edificio en tiempo real.

Mientras que los agentes personales se encargan del aprendizaje de las preferencias de los ocupantes en términos de parámetros medibles (temperatura, humedad, iluminación y la creación de coeficientes de rendimiento). El agente local tiene entre sus funciones la mediación para conciliar las preferencias de los diferentes ocupantes a través de una decisión adecuada tomada de un algoritmo basado en reglas estáticas y dinámicas. Además, el agente local le asigna una prioridad a cada agente-ocupante según la zona en la que esté (ejemplo: el ocupante tiene prioridad sobre su sala, pero no en zonas comunes u otras salas).

Los agentes que inician una negociación son los responsables de una primera propuesta, con el objetivo de generar un consenso. Cuando no lo hay, se generan nuevos negociadores de manera aleatoria hasta alcanzar el consenso.

Desde el enfoque de los MAS, se han realizado otros trabajos como el de [Rutishauser et al., 2005], que presentó un MAS basado en un algoritmo de aprendizaje que empleaba la lógica difusa para supervisar en tiempo real. Se trataba de un sistema colaborativo, con una comunicación mediante mensajes asíncronos, con tres tipos de agentes:

- Agentes que interactúan con los dispositivos.
- Agentes de comunicación y gestión de la información.

- Agentes destinados al aprendizaje: Este aprendizaje se adquiere mediante la observación de los comportamientos de sus ocupante, sin inmiscuirse estos, el MAS tiene la capacidad de diferenciar entre efectos y preferencias de los diferentes ocupantes, y por lo tanto las preferencias que se aprenden, se juntan sólo en la habitación en la que se encuentran.

[Duangsuwan y Liu, 2009] proponen un modelo Epistemic-Deontic-Axiologic (EDA), compuesto por tres compoene principales: el componente epistémico (E-componente), componente deóntico (D-componente) y el componente axiológico (A-componente). Además, se incluyen dos componentes externos, una interfaz de percepción y otra de acción.

Como se observa en la tabla 14.2 el modelo tiene bastante similitud al de Creencias-Hechos-Intenciones.

**Tabla 14.2:** Modelo EDA frente a modelo BDI.

EDA	Normas	Actitudes	Definición	BDI
	percepción	ontológica		
<b>E-componente</b>	evaluación	axiológica	Representa las propias creencias	<b>Creencias</b>
<b>D-componente</b>	cognitivas	epistémica	Representa los comportamientos, las obligaciones y los derechos.	<b>Hechos</b>
<b>A-componente</b>	conductuales	deóntica	Representa los planes o intenciones disponibles, pues este componente se encarga de la evaluación	<b>Intenciones</b>

Las normas asociadas son:

- Cognitiva: permite incorporar las creencias y el conocimiento de una cultura, para interpretar lo que se percibe y entender los conocimientos existentes.
- Evaluativas: permiten evaluar el estado de las cosas y también explicar ciertas creencias, valores y objetivos. La evaluación puede estar basada no sólo en el límite físico, sino también en un límite social.
- Comportamiento: estas normas determinar el comportamiento del ser humano dentro de patrones regulares. Estas normas determinan cómo se debe comportar el agente bajo ciertas condiciones, y define lo que un agente debe realizar para alcanzar un estado en determinadas condiciones.

## 14. TÉCNICAS APLICADAS A LA MEJORA DEL CONFORT CLIMÁTICO

- Denotativas: dependen de la cultura de una comunidad o grupo social.

[Duangsuwan y Liu, 2009] proponen una norma de representación de las políticas de los edificios inteligentes, basándose en EDA, afirmando que un agente está autorizado a razonar acerca de las normas, por lo que decide ampliar con una descripción minuciosa este trabajo. Teniendo en cuenta el concepto de norma, como un elemento social que se establece dentro de una sociedad u organización para regular las acciones, comportamientos e interacciones de sus miembros; y que influyen en las capacidades y determinación de los agentes. Es decir, son las normas, obligaciones y prohibiciones las que limitan a los agentes, al igual que en la sociedad estas ejercen una presión que la limita en sus acciones.

Por lo tanto, la representatividad de un agente cuando toma un rol o pertenencia a cierto grupo, queda delimitada por el conjunto de deberes, privilegios, autoridad, responsabilidad, etc. que este le otorga. En los edificios inteligentes, el ahorro energético o eficiencia y el aumento de rendimiento o confort (satisfacción) son los factores más importantes, y estos deben conformar el elemento base de representación de los agentes en su definición.

Las normas se estructuran en seis componentes: el carácter, el contenido, la condición de la solicitud, la autoridad, el sujeto(s) y la ocasión [Von Wright, 1963]. En la tabla 14.3, se presentan ejemplos de estructuras de reglas para los agentes.

**Tabla 14.3:** Reglas de los agentes.

Reglas	
(n)Cuando<situation(C)> entonces<agent(R)>es<actitud deontológica(A)> hacer<acción(TC)>	[Stamper et al., 2000]
(n)Cuando<condición(C)>si<estado (C)> entonces<agent(R)>es<operador deontológico(A)> hacer<acción(TC)>	[Liu y Dix, 1997]
N = (n, C, R, A, TC)	[Duangsuwan y Liu, 2009]

La norma se define como  $N = (n, C, R, A, TC)$  donde  $n$  es el identificador de la norma,  $C$  es el activador de la norma,  $R$  es el rol asociado o agente  $A$  es



la especificación de la actividad por consecución de un estado o ejecución de una acción, y **TC** son las condiciones de terminación que hacen que la norma quede inactiva.

Por ejemplo, cuando una persona entra en una sala (**C**) si es el puesto de trabajo de esa persona (**R**), el agente de la zona está obligado (**n**) a establecer las condiciones de la habitación de acuerdo al estado actual de las preferencias del usuario (**A**) hasta que la persona cambia el estado actual de condiciones (**TC**).

El trabajo de [Duangsuwan y Liu, 2009] utiliza valores ambientales medios como método razonable para las condiciones ambientales de los ocupantes. Un modelo muy básico y estático para el tratamiento del confort de los ocupantes.

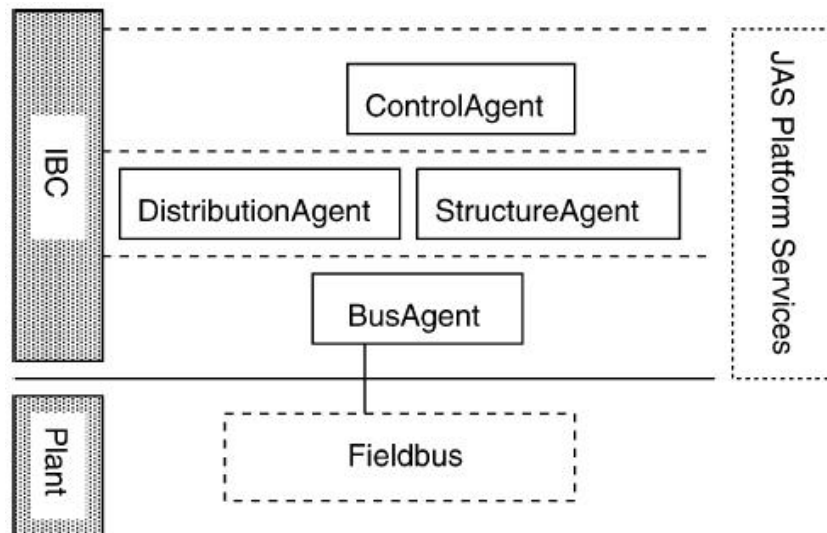
Por último, cabe destacar que las técnicas empleadas tienden a ser aplicadas en conjunto. Existen agentes y MAS que usan reglas de lógica difusa, sensores de enlace y efectores. Por ejemplo, el diseño del sistema de [Rutishauser et al., 2005], se basa en el aprendizaje de las reglas de comportamiento a partir de la retroalimentación que recibe de los ocupantes del edificio, mediante el uso de MAS que hacen hincapié en la toma de decisiones locales, donde cada agente controla e informa de una subregión del espacio en estudio. La diferencia fundamental de este diseño se encuentra en que aprende la lógica en lugar de las estadísticas, además el conocimiento es representado por reglas difusas que se utilizan para la toma de decisiones [Eng et al., 2003].

Las reglas difusas para las decisiones se construyen por un proceso de aprendizaje que continuamente modifica el conjunto de normas de acuerdo a la retroalimentación que recibe del medio ambiente. Además este enfoque se centra en el edificio en su conjunto, en lugar de un conjunto de salas independientes. A diferencia de otros [Coen et al., 1998] [Eng et al., 2003] que se centran en una habitación inteligente e individual. Por ejemplo, Coen detecta cuando las personas se encuentran en el ambiente, mediante el seguimiento de personas, observa lo que están haciendo o si interactúa con otras. Toda la información se adquiere por medios que el usuario no percibe o mediante acciones del usuario que generan conocimiento, por ejemplo, encender la luz.

[Rutishauser et al., 2005] presentó un MAS colaborativo formado por varios tipos de agentes, como se observa en la figura 14.12.

## 14. TÉCNICAS APLICADAS A LA MEJORA DEL CONFORT CLIMÁTICO

---



**Figura 14.12:** MAS colaborativo [Rutishauser et al., 2005].

- En la capa más baja están los agentes responsables del bus de datos (BusAgent).
- La capa intermedia contiene:
  - El agente de distribución (DistributionAgent) encargado de la comunicación entre agentes, éste administra los datos externos (sensores, actuadores, etc.) y la información de mensajes en términos de temas.
  - El agente de estructura (StructureAgent), es el encargado de la relación entre sensores y actuadores, esta varía según el lugar que ocupan los elementos en el edificio, aunque en [Rutishauser et al., 2005] la estructura usada es estática.
- En el nivel más alto están los agentes inteligentes con capacidad de aprendizaje localizado.

Éstas son las distintas instancias de control responsables de los efectores.

La unidad de decisión y aprendizaje que aplicaron se basó en dos tipos de entradas, el primer grupo constaba de las entradas que se relacionan con el edificio en su conjunto, es decir, variables como la humedad, la temperatura, la radiación,

la iluminación y el tiempo. El segundo grupo se asociaba a variables que están disponibles para todas las salas, este grupo se compone de información de presencia, luz de día, intensidad de la luz en el interior y el estado de la luz-oscuridad.

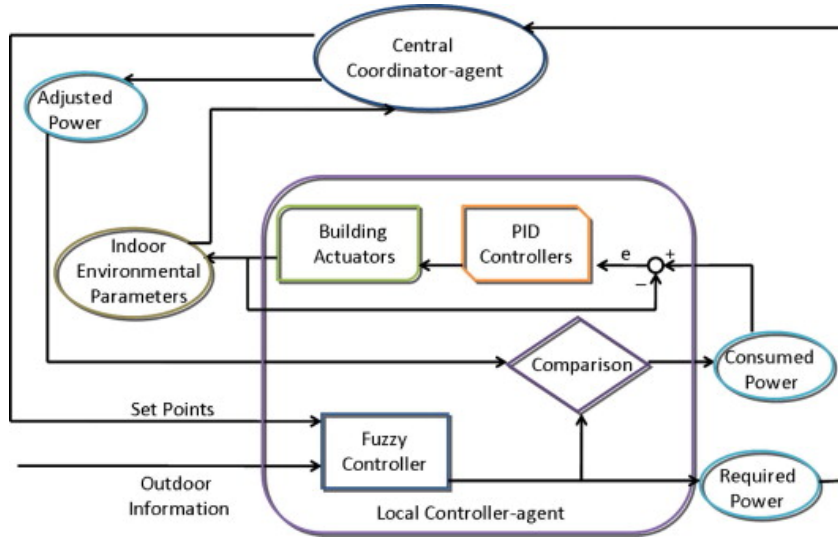
Pese a la importante cantidad de información con la que se trabaja en este sistema, las decisiones en particular estaban asociadas a un pequeño conjunto de datos del sistema (ejemplo, las luces e interruptores o la presencia), el estado de las salidas de cada decisión en particular se basó en la lógica difusa, aun así en algunos casos se asociaban decisiones puramente reactiva, como ocurre con el problema de iluminación, este es el caso del efecto de presionar el interruptor de la luz, esta se enciende, independientemente de la intensidad de la luz que sea necesaria aplicar.

Todos estos trabajos indican la necesidad de los sistemas de aprender continuamente por sí mismo [Mozer, 1998] [Mozer, 1999], como un requisito básico para los edificios inteligentes.

El trabajo de [Wang et al., 2012], presenta un MAS de control formado por diferentes agentes con diferentes funciones, el sistema considera tres principales factores de confort: el termal, el visual y la calidad del aire. En la figura 14.13, se presentan los diferentes agentes, destaca el agente coordinador central, este agente aplica un operador de agregación, una media ponderada ordenada (OWA, *Ordered Weighted Averaging*) que define el índice de confort (IC) como  $IC = OWA(\mu_T, \mu_L, \mu_A) = \sum_{j=1}^3 \omega_j b_j$  donde  $\omega_j$  es el peso del factor  $j$  y representa la importancia de cada factor respecto al confort,  $b_j$  es el número mayor de  $j$  de la colección de los tres objetos agregados, asociándose así los tres subsistemas, mediante este sistema el confort medio global se incrementa en un 3 % , mientras se ahorra alrededor de 9 % de energía después de ajustar los rangos de confort. [Yang y Wang, 2012] presenta un sistema similar que aplica un algoritmo multiobjetivo.

En el área del confort surgen otras terminologías, como ambiente ecológico (AE, *Ambient Ecology*), se trata de una visión del comportamiento del edificio como si fuera un ambiente inteligente, en el cual a través de MAS, se controla el comportamiento de elementos asociados al confort, como el HVAC, la luz, la música o un álbum de fotos. [Wagner et al., 2012] presenta un sistema que aplica la lógica difusa para estructurar las reglas de comportamiento cuando un usuario esta tumbado en el salón viendo la televisión o realizando una actividad, y en base a esta decide elementos como la intensidad de la luz. Este enfoque es interesante,

## 14. TÉCNICAS APLICADAS A LA MEJORA DEL CONFORT CLIMÁTICO



**Figura 14.13:** Estructura del sistema de [Wang et al., 2012].

pues si en un sistema somos capaces de definir la actividad que se está realizando, se puede seleccionar la intensidad de la luz o la temperatura, en el caso del visionado televisivo, se reconoce el estado de reposo, por lo que la intensidad de la luz y del sistema de HVAC no debe ser tan alto, esta investigación demuestra que en el futuro se podrán reconocer en las viviendas patrones de comportamiento en base a los cuales tomar decisiones que afecten al confort de los usuarios.

Como ocurre en todas las metodologías que se han desarrollado con anterioridad, existe más literatura aparte de la mencionada, por ejemplo, para agentes: [Dounis y Caraiscos, 2008], [Hagras et al., 2004] o [Mo y Mahdavi, 2003], e igualmente para MAS: [Hagras et al., 2003] o [Qiao et al., 2006].

Aun así, cualquier nueva tecnología en los sistemas de los edificios, permitiría generar un nuevo diseño basado en agentes, por lo que se puede decir que el futuro de este campo está abierto a nuevos diseños.

En el siguiente apartado, se muestra un resumen de las metodologías aplicadas a los sistemas de HVAC que se han mencionado en los últimos apartados. Además, en la tabla resumen 14.4 se presentan las características del problema que son tratadas (temperatura, calidad del aire, energía, etc.).

En la figura 14.14 se presenta un posible sistema multiagente aplicado a un HVAC en un edificio. El HVAC podría estar representado por un agente, igualmen-

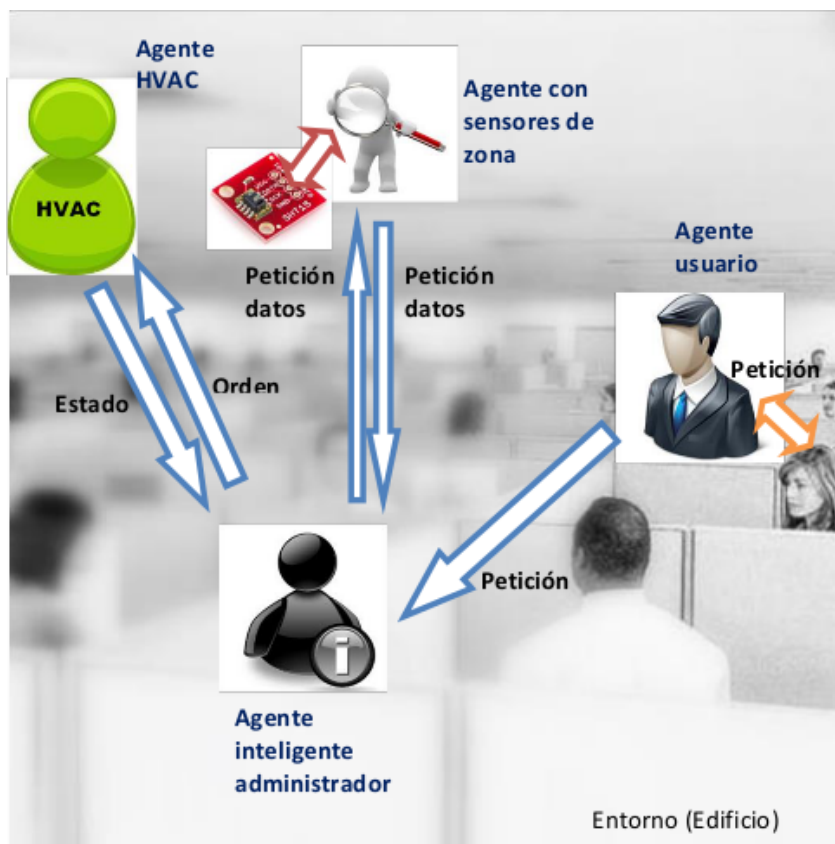
**Tabla 14.4:** Tabla resumen de los SMA aplicados.

Agente	MAS	Temperatura	Humedad	Ventilación	Calidad aire ( $CO_2$ )	Iluminación	Consumo Energía	
								[Dounis y Caraiscos, 2008]
								[Duangsuwan y Liu, 2008]
								[Duangsuwan y Liu, 2009]
								[Hagras et al., 2003]
								[Hagras et al., 2004]
								[Mo y Mahdavi, 2003]
								[Qiao et al., 2006]
								[Klein et al., 2012]
								[Rutishauser et al., 2005]
								[Wagner et al., 2012]
								[Wang et al., 2012]
								[Yang y Wang, 2012]

## 14. TÉCNICAS APLICADAS A LA MEJORA DEL CONFORT CLIMÁTICO

---

te, cada usuario del sistema podría tener asociado un agente. El agente realizaría la petición para que se modificara el ambiente de su entorno. Otro conjunto de agentes representaría a los agentes de cada zona del edificio, estos se comunicarían con los agentes encargados de la administración inteligente del edificio, que realizarían la actividad de administración y decisión climática en base a: los sensores, las valoraciones ofrecidas por los agentes usuarios y el estado del sistema de HVAC.



**Figura 14.14:** Características de los agentes.

### 14.5 Comparativa de técnicas aplicadas

En las Tablas 14.5 y 14.6 se presenta un resumen de técnicas aplicadas por los diferentes autores, y como estas se mezclan en el objetivo de alcanzar el confort.

## 14.5 Comparativa de técnicas aplicadas

Tabla 14.5: Comparativa (Parte I).

PMV	PID	Lógica difusa	Redes Neuronales	Algoritmo genético	Otros algoritmos	Agentes & MAS	
							[Anderson et al., 2004]
							[Argiriou et al., 2000]
							[Argiriou et al., 2004]
							[Calvino et al., 2004]
							[Dalamagkidis et al., 2007]
							[Davidsson y Boman, 2005]
							[Doctor et al., 2005]
							[Dounis y Manolakis, 2001]
							[Dounis y Caraiscos, 2007]
							[Dounis y Caraiscos, 2008]
							[Duangsuwan y Liu, 2008]
							[Duangsuwan y Liu, 2009]
							[Egilegor et al., 1997]
							[Guillemin y Molteni, 2002]
							[Gouda et al., 2006]
							[Hagras et al., 2003]
							[Hagras et al., 2004]
							[Homod et al., 2012]
							[Huang y Lam, 1997]
							[Kanarachos y Geramanis, 1998]
							[Klein et al., 2012]
							[Kolokotsa et al., 2001]
							[Kolokotsa et al., 2002]
							[Kolokotsa, 2003]
							[Levermore, 1992]

## 14. TÉCNICAS APLICADAS A LA MEJORA DEL CONFORT CLIMÁTICO

---

**Tabla 14.6:** Comparativa (Parte II).

PMV	PID	Lógica difusa	Redes Neuronales	Algoritmo genético	Otros algoritmos	Agentes & MAS	
							[Liang y Du, 2005]
							[Liang y Du, 2008]
							[Magnier y Haghighat, 2010]
							[Mo y Mahdavi, 2003]
							[Moon y Kim, 2010]
							[Morel et al., 2001]
							[Nassif et al., 2004]
							[Qiao et al., 2006]
							[Rutishauser et al., 2005]
							[Shahnawaz Ahmed et al., 2007]
							[Shepherd y Batty, 2003]
							[Sierra et al., 2005]
							[Soyguder et al., 2009]
							[Soyguder y Alli, 2009a]
							[Soyguder y Alli, 2010]
							[Tripolitakis et al., 2004]
							[Wagner et al., 2012]
							[Wang y Jin, 2000]
							[Wang y Xu, 2002]
							[Wang y Xu, 2004]
							[Wang et al., 2012]
							[Wright et al., 2002]
							[Yalcintas y Akkurt, 2005]
							[Yamada et al., 1999]
							[Yang y Wang, 2012]



### 14.6 Conclusiones

Un breve conjunto de técnicas aplicadas a la climatización se han presentado y resumido mediante una tabla comparativa. Se observa que los autores diseñan sistemas aplicando diversas técnicas de forma conjunta para solucionar este tipo de problemas. Destaca la lógica difusa como herramienta para la toma de decisiones en los intervalos en los cuales la decisión o salida no es clara y los MAS en aquellas situaciones donde varios elementos influyen en el sistema.



*Todo el conocimiento, la totalidad  
de preguntas y respuestas se en-  
cuentran en el perro*

Franz Kafka

# CAPITULO 15

## Encuestas

En los capítulos anteriores se han presentado los índices que se aplican al estudio del confort, en base a uno o varios parámetros. Sin embargo, la única forma de conocer el confort es captando las sensaciones de los ocupantes de un espacio. La forma más directa de conocer estas sensaciones es mediante la propia encuesta a los usuarios. De ésta forma, son los propios ocupantes los que generan el conocimiento a partir del cual los sistemas deben decidir las variaciones en las condiciones de confort interior.

### 15.1 Evaluación térmica subjetiva

El objetivo principal de las instalaciones de climatización de un edificio es alcanzar unas determinadas condiciones de bienestar o confort térmico para sus ocupantes, es decir, una valoración de la satisfacción con las condiciones térmicas del espacio en el que se encuentra. Se trata, por lo tanto, de una valoración subjetiva que puede estar condicionada por multitud de variables que dependan del propio sujeto que la emita, como son su edad, condición física, sexo, vestimenta, etc. Por tanto, la evaluación del confort sólo puede realizarse a través de encuestas realizadas a los ocupantes de un cierto espacio en un cierto momento. Como resultado de dichas encuestas sólo se puede concluir que un porcentaje determinado de los ocupantes

## 15. ENCUESTAS

---

de dicho espacio se sienten satisfechos o insatisfechos con las condiciones térmicas de su entorno. Otra posible lectura de dichas encuestas sería expresar en una cierta escala el grado de satisfacción de los mismos.

En la actualidad existe una norma internacional ISO 10551:1995 [AENOR, 2002] referida a la influencia del ambiente térmico empleando escalas de juicio subjetivo. Esta norma ISO expresa un conjunto de especificaciones relativas a la evaluación directa del experto del bienestar o malestar térmico respecto de las condiciones ambientales de un lugar de trabajo.

Los SE, necesitan del conocimiento de un experto para el desarrollo y comprobación de un sistema, en este caso el ergónomo es la figura de interés que los sistemas expertos actuales quieren “imitar”, ya que estos son capaces de calcular los valores de varios índices, como son el índice de sensación térmica del viento (WCI, *Wind Chill Index*, ISO-11079 [AENOR, 2009]), PMV (ISO-7730) [AENOR, 2006], PPD (ISO-7730) [AENOR, 2006] o el índice de temperatura de globo con bulbo húmedo (WBGT, *Wet Bulb Globe Temperature*, ISO-27243 [AENOR, 1995]) con los cuales son capaces de predecir las condiciones ambientales que de manera general suelen sentir los trabajadores.

Deben ser los ergónomos los expertos encargados de determinar cuáles son los límites de tolerancia que los trabajadores o usuarios no deben de sobrepasar mediante el uso de juicios subjetivos, definiendo los criterios de admisión en base a los riesgos que ciertos valores tienen respecto a la salud. Por tanto, todo sistema que pretenda usar las preferencias subjetivas o no de un usuario, debe estar limitado a ciertas normas ya sean por decisión del ergónomo experto o por las leyes y normativas de un país.

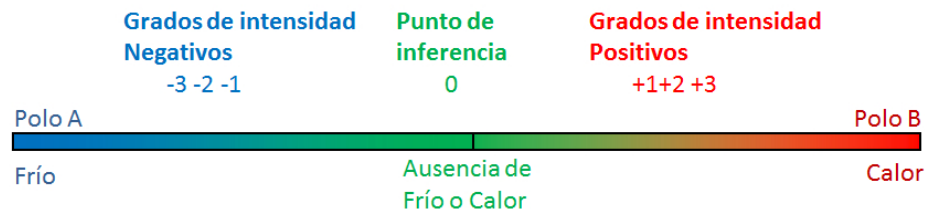
Según la ISO 10551:1995 [AENOR, 2002], respecto a la subjetividad, existen dos cuestiones a abordar. La relación existente entre la información objetiva y la subjetiva, y el valor que proporcionan estas escalas.

En el estudio de las respuestas subjetivas, las respuestas dadas en tiempos inferiores a 30 minutos desde la entrada en el edificio, suelen ser descartadas por ser una situación puntual fruto de la exposición a un cambio térmico exterior.

La norma expresa la importancia que tiene el orden de estudio de las escalas de juicio. En primer lugar se debe observar la escala perceptiva, en segundo lugar la evaluativa y en último lugar la escala preferencial.

## 15.1 Evaluación térmica subjetiva

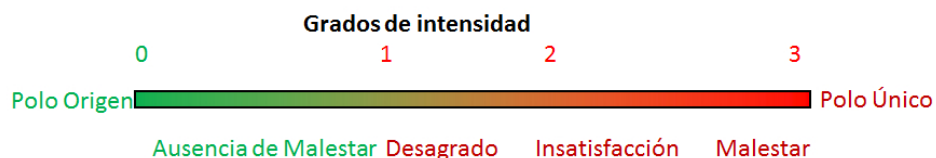
En los casos de climas similares al español, se suele usar una escala de 7 grados, por no encontrarse ambientes muy fríos o calurosos. La estructura de la escala de percepción térmica personal se muestra en la figura 15.1.



**Figura 15.1:** Grados de percepción térmica.

Aunque la formulación de los grados, dependerá del léxico de cada idioma, existiendo para cada idioma una formulación, en [Humphreys, 2008] se bromeaba con la pregunta “Why did the piggy bark?” (“¿Por qué el cerdo ladró?”). Refiriéndose a los efectos del lenguaje y el contexto en la interpretación de las palabras, utilizadas en las escalas de preferencia térmica de diferentes lenguas. Como ejemplo, el autor utilizaba un ejemplo real bastante gracioso: “Mi nieto, tiene miedo de los perros, un día vino con nosotros a visitar a un amigo que era dueño de un bulldog francés en miniatura. Para nuestra sorpresa Mateo no mostró su miedo al perro. Finalmente, el perro ladró. Mateo se quedó perplejo. Y dijo ‘Mamá, ¿por qué el cerdo ladró?’”. La situación demuestra que los estímulos visuales y auditivos por sí solo no determinan la respuesta emocional y física del niño, en este caso el descriptor de aplicación a los animales (“perro” o “cerdo”) fue decisivo de la misma forma que lo es en las escalas térmicas de cada país-lenguaje. En la tabla 15.1 se muestran dos formulaciones diferentes de carácter perceptivo.

La estructura de la escala de evaluación térmica personal tiene la estructura mostrada en la figura 15.2.



**Figura 15.2:** Grado de malestar térmico.

## 15. ENCUESTAS

**Tabla 15.1:** Escala térmica en español.

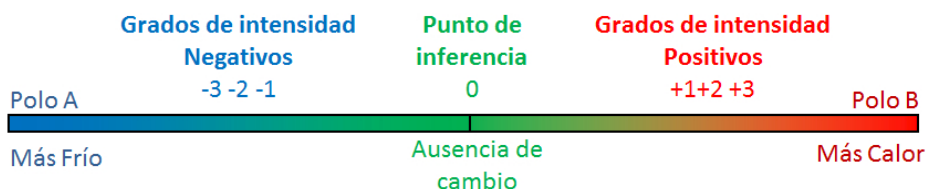
La formulación con un único término es:			
Polos	Grados	¿Qué siente usted en este momento? Tengo...	¿Cómo valora la sensación térmica? Es...
CALOR	(+4)	Calor excesivo	
	+3	Mucho calor	Calurosa
	+2	Calor	Cálida
	+1	Algo de calor	Ligeramente cálida
INDIFERENCIA	0	Ni frío, ni calor	Neutra
FRÍO	-1	Algo de frío	Ligeramente fría
	-2	Frío	Fría
	-3	Mucho frío	Muy fría
	(-4)	Frío excesivo	
		Anexo A, ISO 10551	Anexo H, ISO 15251
		[AENOR, 2002]	[AENOR, 2002]

En la tabla 15.2 se muestra la escala para una pregunta de carácter evaluativo.

**Tabla 15.2:** Grados de malestar.

Polos	Grados	¿Cómo se encuentra usted? Estoy...
	0	Cómodo
	1	Algo incómodo
	2	Incómodo
MALESTAR	3	Muy incómodo
	4	Extremadamente Incómodo

La escala de preferencia térmica tiene la estructura mostrada en la figura 15.3.



**Figura 15.3:** Escala de preferencia.

## 15.2 Otros elementos de evaluación

En la tabla 15.3 se muestran dos escalas para la preferencia térmica de los usuarios.

**Tabla 15.3:** Grados de preferencia.

Indique qué preferiría tener ahora. Preferiría tener...			
Polos	Grados	Formulación en escala de 7 grados	Formulación en escala de 3 grados
MÁS CALOR	+3	Mucho más calor	Más calor
	+2	Más calor	
	+1	Un poco más de calor	
INDIFERENCIA	0	Ni más frío, ni más calor	Ni más frío, ni más calor
MÁS FRÍO	-1	Un poco más de frío	Más frío
	-2	Más frío	
	-3	Mucho	

La aceptabilidad personal puede expresarse en una escala continua que responde a la pregunta ¿Cómo percibe la calidad del aire? o ¿Cómo percibe la calidad del aire desde el punto de vista personal?. La escala de respuesta podría ser: claramente aceptable, aceptable, inaceptable, claramente inaceptable. Otra posibilidad es la escala de tolerancia personal que se muestra en la tabla 15.4.

**Tabla 15.4:** Tolerancia personal.

Polos	Grados	En su opinión, esto es?
DIFICULTAD PARA TOLERAR	0	Perfectamente soportable/tolerable
	1	Un poco difícil de soportar/tolerar
	2	Algo difícil de soportar/tolerar
	3	Muy difícil de soportar/tolerar
	4	Insoportable/intolerable

Como se puede observar en la figura 15.4 la evaluación del estrés térmico se puede estudiar en base al estudio de cinco juicios de valor: tres personales y dos ambientales.

## 15.2 Otros elementos de evaluación

En la sección anterior, se ha presentado una evaluación del estrés térmico, aun así, se puede sugerir la incorporación de otras preguntas asociadas al confort. En la

## 15. ENCUESTAS

---



**Figura 15.4:** Juicios de evaluación.

tabla 15.5 se presenta una pregunta asociada a la calidad del aire y en la tabla 15.6 se presenta una pregunta asociada al olor. Las respuestas a esta pregunta pueden ser contrastadas con un sensor de calidad del aire.

**Tabla 15.5:** Calidad del aire.

Polos	Grados	¿Cómo percibe la calidad del aire?
+	+2	Claramente aceptable
	+1	Aceptable
	-1	Inaceptable
-	-2	Claramente inaceptable

**Tabla 15.6:** Olor en el ambiente.

Polos	Grados	¿Cómo percibe la intensidad del olor?
	0	Sin olor
	1	Olor débil
	2	Olor moderado
	3	Olor fuerte
	4	Olor muy fuerte
	5	Olor abrumador

Un sensor de luminosidad, puede permitir conocer el confort de los usuarios con la intensidad de la luz, y debido a la radiación producida por la luz, también se puede conocer si esta afecta al confort. La tabla 15.7 presenta una pregunta asociada a la luz natural en el trabajo, y la tabla 15.8 presenta una pregunta asociada a la luz artificial.



## 15.2 Otros elementos de evaluación

**Tabla 15.7:** Calidad de la iluminación natural.

Polos	Grados	¿Cómo describiría la calidad de la iluminación natural en su área de trabajo?
+	+2	Claramente aceptable
	+1	Aceptable
	-1	Inaceptable
-	-2	Claramente inaceptable

**Tabla 15.8:** Calidad de la iluminación artificial.

Polos	Grados	¿Cómo describiría la calidad de la iluminación artificial en su área de trabajo?
+	+2	Claramente aceptable
	+1	Aceptable
	-1	Inaceptable
-	-2	Claramente inaceptable

El metabolismo de una persona varía, la energía utilizada por las células de su cuerpo depende de varios factores, como el sexo, talla, peso, edad, etc. El metabolismo es el gasto energético diario, aunque la tasa metabólica disminuye con la edad y con la pérdida de masa corporal. El aumento de la masa muscular es lo único que puede incrementar esta tasa. Al gasto general de energía también pueden afectarle las enfermedades, los alimentos y bebidas consumidas, la temperatura del entorno y los niveles de estrés. Por esta razón, se sugieren las cuestiones de las tablas 15.9, 15.10 y 15.11.

**Tabla 15.9:** Actividad personal.

Polos	Grados	La actividad que está realizando...
-	-1	Le estresa
	0	Es normal
+	+1	Le relaja

La temperatura del cuerpo, varía ligeramente después de comer o beber, dependiendo del tipo y temperatura de los alimentos. El cuerpo conduce el calor a través del sistema circulatorio, del mismo modo, la sangre se mueve por el sistema

## 15. ENCUESTAS

---

**Tabla 15.10:** Estado personal.

Polos	Grados	En este momento, usted se encuentra...
+	+3	Feliz
	+2	Optimista
	+1	Entusiasmado
	0	Normal
	-1	Apático
	-2	Deprimido
-	-3	Triste

digestivo. Una vez que se inicia la digestión, la temperatura corporal puede variar aún más en respuesta a los alimentos fríos o calientes que se consuman. Los alimentos que requieren más energía para digerirse, como pueden ser las proteínas, también producirán mayor temperatura en el cuerpo como subproducto del proceso de digestión, durante la media hora después de una ingesta se puede producir esta sensación de cambio en la temperatura corporal. Esta es la razón de incorporar la pregunta de la tabla 15.11.

**Tabla 15.11:** Estado alimenticio.

¿Has comido o bebido algo en los últimos 30 minutos?
No nada
He bebido algo
He comido algo
He desayunado
He almorzado
He merendado
He cenado

### 15.3 Justificación

Como se puede observar en las tablas 15.12 y 15.13 que resumen los datos de estudio de las investigaciones de los autores mencionados en el estado del arte, sólo encontramos tres estudios basados en preferencias no fijas o en aprendizaje.

### **15.3 Justificación**

---

La personalización en base a encuestas de estos sistemas está poco estudiada, por lo que se justifica el estudio de los HVAC mediante el uso de la evaluación subjetiva.

## 15. ENCUESTAS

**Tabla 15.12:** Comparativa (Parte I).

Aprendizaje	Preferencias fijas o reactivas	Preferencias encuesta	Temperatura	Humedad	Ventilación	Calidad $CO_2$	Iluminación	Energía Consumo	
									[Anderson et al., 2004]
									[Argiriou et al., 2000]
									[Argiriou et al., 2004]
									[Calvino et al., 2004]
									[Dalamagkidis et al., 2007]
									[Davidsson y Boman, 2005]
									[Doctor et al., 2005]
									[Dounis y Manolakis, 2001]
									[Dounis y Caraiscos, 2007]
									[Dounis y Caraiscos, 2008]
									[Duangsuwan y Liu, 2008]
									[Duangsuwan y Liu, 2009]
									[Egilegor et al., 1997]
									[Gouda et al., 2006]
									[Guillemin y Molteni, 2002]
									[Hagras et al., 2003]
									[Hagras et al., 2004]
									[Hamdi y Lachiver, 1998]
									[Homod et al., 2012]
									[Huang y Lam, 1997]
									[Kanarachos y Geramanis, 1998]
									[Klein et al., 2012]
									[Kolokotsa et al., 2001]
									[Kolokotsa et al., 2002]
									[Kolokotsa, 2003]
									[Liang y Du, 2005]

Tabla 15.13: Comparativa (Parte II).

Aprendizaje	Preferencias fijas o reactivas	Preferencias encuesta	Temperatura	Humedad	Ventilación	Calidad $CO_2$	Iluminación	Energía Consumo	
									[Liang y Du, 2008]
									[Magnier y Haghighat, 2010]
									[McCartney y Nicol, 2002]
									[Mo y Mahdavi, 2003]
									[Moon y Kim, 2010]
									[Nassif et al., 2004]
									[Morel et al., 2001]
									[Nicol y Humphreys, 2010]
									[Qiao et al., 2006]
									[Rutishauser et al., 2005]
									[Shahnawaz Ahmed et al., 2007]
									[Shepherd y Batty, 2003]
									[Sierra et al., 2005]
									[Soyguder y Alli, 2009a]
									[Soyguder y Alli, 2010]
									[Tripolitakis et al., 2004]
									[Wagner et al., 2012]
									[Wang y Jin, 2000]
									[Wang y Xu, 2002]
									[Wang y Xu, 2004]
									[Wang et al., 2012]
									[Wright et al., 2002]
									[Yalcintas y Akkurt, 2005]
									[Yamada et al., 1999]
									[Yang y Wang, 2012]

## 15. ENCUESTAS

---

### 15.4 Evaluación de la ropa

Actualmente, no existen elementos que permitan calcular la indumentaria que llevan las personas. Sin embargo, en las oficinas de los edificios, la indumentaria suele ser similar, y solo varía por temporadas. Además, es necesario conocer el índice de indumento. Éste sirve para valorar el aislamiento que proporciona el indumento (la ropa o vestimenta junto con otros accesorios) que las personas se ponen frente a las inclemencias del tiempo para ajustar su confort. Este índice tiene como unidad de medida el *clo* y se determina entre 0 *clo* que es la falta total de aislamiento o desnudez, y 1 *clo* que es el indumento normal de un varón, es decir traje con chaqueta de algodón, camisa de algodón, ropa interior normal, también de algodón, calcetines y zapatos. Este índice permite valorar el influjo de la indumentaria sobre las necesidades térmicas del cuerpo humano ante las temperaturas ambientales. Para calcular este índice se suman los índices de las prendas que viste el sujeto, basándonos en las tablas 15.14 y 15.15.

## 15.4 Evaluación de la ropa

**Tabla 15.14:** Valores de la resistencia térmica específica del atuendo (I).

Descripción de las prendas	Resistencia térmica (clo)
Ropa interior	
Calzoncillos	0,03
Calzoncillos largos	0,10
Camiseta de tirantes	0,04
Camiseta de manga corta	0,09
Camiseta de manga larga	0,12
Sujetadores y bragas	0,03
Camisas - Blusas	
Manga corta	0,15
Ligera, mangas cortas	0,20
Normal, mangas largas	0,25
Camisa de franela, mangas largas	0,30
Blusa ligera, mangas largas	0,15
Pantalones	
Corto	0,06
Ligero	0,20
Normal	0,25
Franela	0,28
Vestidos - Faldas	
Falda ligera (verano)	0,15
Falda gruesa (invierno)	0,25
Vestido ligero, mangas cortas	0,20
Vestido de invierno, mangas largas	0,40
Mono de trabajo	0,55
Chaleco	
Chaleco sin mangas	0,12
Chaleco ligero	0,20
Chaleco medio	0,28
Chaleco grueso	0,35

## 15. ENCUESTAS

---

**Tabla 15.15:** Valores de la resistencia térmica específica del atuendo (II).

Descripción de las prendas	Resistencia térmica (clo)
Chaqueta	
Chaqueta ligera de verano	0,25
Chaqueta normal	0,35
Bata de trabajo (guardapolvo)	0,30
Prendas forradas con elevado aislamiento	
Mono de trabajo	0,90
Pantalón	0,35
Chaqueta	0,40
Chaleco	0,20
Prendas exteriores de abrigo	
Abrigo	0,60
Chaqueta larga	0,55
Parka	0,70
Mono forrado	0,55
Diversos	
Calcetines	0,02
Calcetines, gruesos cortos	0,05
Calcetines, gruesos largos	0,10
Medias de nylon	0,03
Zapatos de suela delgada	0,02
Zapatos de suela gruesa	0,04
Botas	0,10
Guantes	0,05



### 15.5 La encuesta de confort online

Se ha demostrado que a menudo hay una discrepancia aguda entre el objetivo de comodidad y el confort subjetivo [Meir et al., 2009]. En vista de los objetivos de confort presentado por el confort térmico de ASHRAE en esta metodología se utiliza la encuesta como un elemento fundamental de la recogida de datos subjetiva.

La encuesta permite conocer las diferentes percepciones de los usuarios acerca de los niveles de confort interior. El sistema almacena la información en relación a la temperatura, humedad, luminosidad, etc. en el momento en que se recogen los datos de la encuesta.

La norma internacional ISO 10551:1995 que estudia la ergonomía del ambiente térmico en base al empleo de las escalas de juicio subjetivo se ha seleccionado como base de estudio. Aun así, a pesar de las peticiones de los encuestados, todos los sistemas deben limitarse a ciertas normas determinadas por un experto en ergonomía, o por las leyes y reglamentos de un país.

Para la metodología propuesta, se ha desarrollado un cuestionario basado en dos estudios. Un primer estudio se basa en las preguntas presentadas en el apartado de evaluación térmica subjetiva. Al que se pueden incorporar las preguntas respecto a otros elementos de confort, como se puede observar en la figura 15.5 y 15.6.

## 15. ENCUESTAS

---

**Encuesta**

<b>Sala</b>	Sala Prueba
<b>Encuesta</b>	Comfort

1. ¿Cómo valora la sensación térmica? \*

- ☐ Muy Fría
- ☐ Fría
- ☐ Ligeramente Fría
- ☐ Neutral
- ☐ Ligeramente Cálida
- ☐ Cálida
- ☐ Caliente

2. ¿Cómo percibe la temperatura? \*

- ☐ Claramente aceptable
- ☐ Aceptable
- ☐ Inaceptable
- ☐ Claramente inaceptable

3. ¿Quiere la temperatura del recinto? \*

- ☐ Más alta
- ☐ Sin cambios
- ☐ Más baja

4. ¿Cómo percibe la calidad del aire? \*

- ☐ Claramente aceptable
- ☐ Aceptable
- ☐ Inaceptable
- ☐ Claramente inaceptable

5. ¿Cómo percibe la intensidad del olor? \*

- ☐ Sin olor
- ☐ Olor débil
- ☐ Olor moderado
- ☐ Olor fuerte
- ☐ Olor muy fuerte
- ☐ Olor abrumador

**Figura 15.5:** Encuesta online (1).

6. ¿Cómo describiría la calidad de la iluminación natural en su área de trabajo? \*

- ☐ Claramente aceptable
- ☐ Aceptable
- ☐ Inaceptable
- ☐ Claramente inaceptable

7. ¿Cómo describiría la calidad de la iluminación artificial en su área de trabajo? \*

- ☐ Claramente aceptable
- ☐ Aceptable
- ☐ Inaceptable
- ☐ Claramente inaceptable

8. La actividad que esta realizando... \*

- ☐ Le estresa
- ☐ Es normal
- ☐ Le relaja

9. En este momento, usted se encuentra... \*

- ☐ Feliz
- ☐ Optimista
- ☐ Entusiasmado
- ☐ Normal
- ☐ Apático
- ☐ Deprimido
- ☐ Triste

10. ¿Has comido o bebido algo en los últimos 30 minutos? \*

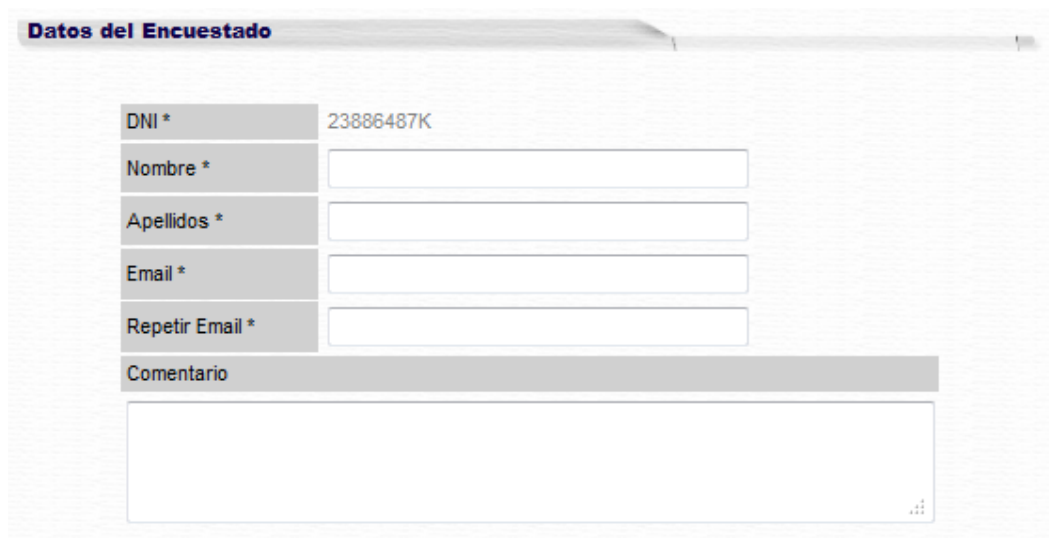
- ☐ No nada
- ☐ He bebido algo
- ☐ He comido algo
- ☐ He desayunado
- ☐ He almorzado
- ☐ He merendado
- ☐ He cenado

**Figura 15.6:** Encuesta online (2).

## 15. ENCUESTAS

---

Además, los usuarios realizan un registro web, y cada día o temporada, realizan un segundo estudio que contiene preguntas centradas en la información personal, el sexo, la edad, la estatura, el peso y el tipo de ropa, como se observa en las figuras 15.7 y 15.8.



The image shows a web form titled "Datos del Encuestado" (Survey Data). The form contains the following fields:

DNI *	23886487K
Nombre *	<input type="text"/>
Apellidos *	<input type="text"/>
Email *	<input type="text"/>
Repetir Email *	<input type="text"/>
Comentario	<input type="text"/>

**Figura 15.7:** Registro online.

En el **capítulo 17** se presentan los **resultados** de un experimento realizado con encuestas online con las preguntas de evaluación térmica subjetiva.

## 15.5 La encuesta de confort online

DNI *	23886487K
Peso *	<input type="text"/>
Altura *	<input type="text"/>
Edad *	<input type="text"/>
<b>1. Género *</b>	
<input type="radio"/> Masculino	
<input type="radio"/> Femenino	
<b>2. Zapatos *</b>	
<input type="radio"/> Zapatos (suela fina)	
<input type="radio"/> Zapatos (suela gruesa)	
<input type="radio"/> Botas	
<b>3. Calcetines *</b>	
<input type="radio"/> Calcetines	
<input type="radio"/> Calcetines gruesos, tobilleros	
<input type="radio"/> Calcetines gruesos, largos	
<input type="radio"/> Medias de Nilón	
<input type="radio"/> -	
<b>4. Ropa Interior 1 *</b>	
<input type="radio"/> Bragas	
<input type="radio"/> Tanga	
<input type="radio"/> Calzoncillo Boxer	
<input type="radio"/> Calzoncillo slip	
<input type="radio"/> Calzoncillo de perneras largas	
<input type="radio"/> -	
<b>5. Pantalones *</b>	
<input type="radio"/> Cortos	
<input type="radio"/> Ligeros	
<input type="radio"/> Normales	
<input type="radio"/> De franela	
<input type="radio"/> -	
<b>6. Ropa Interior 2 *</b>	
<input type="radio"/> Camiseta sin mangas	
<input type="radio"/> Camiseta de manga corta	
<input type="radio"/> Camiseta de manga larga	
<input type="radio"/> -	
<b>7. Camisas/Blusas *</b>	
<input type="radio"/> Mangas cortas	
<input type="radio"/> Ligeras, mangas largas	
<input type="radio"/> Normales, mangas largas	
<input type="radio"/> De franela, mangas largas	
<input type="radio"/> Blusa ligera, mangas largas	
<input type="radio"/> -	
<b>8. Vestidos/Faldas *</b>	
<input type="radio"/> Faldas ligeras (verano)	
<input type="radio"/> Faldas gruesas (invierno)	
<input type="radio"/> Vestidos ligeros, mangas cortas	
<input type="radio"/> Vestidos de invierno, mangas largas	
<input type="radio"/> Monos	
<input type="radio"/> -	
<b>9. Jerseys *</b>	
<input type="radio"/> Chalecos sin mangas	
<input type="radio"/> Jersey fino	
<input type="radio"/> Jersey	
<input type="radio"/> Jersey grueso	
<input type="radio"/> -	
<b>10. Chaquetas *</b>	
<input type="radio"/> Ligeras, de verano	
<input type="radio"/> Chaquetas	
<input type="radio"/> Batas	
<input type="radio"/> -	

**Figura 15.8:** Encuesta diaria o estacional.

### 15.6 Conclusiones

La sensación subjetiva del usuario, es la única información que puede permitir conocer el verdadero confort de los ocupantes de un edificio. Los edificios deben aprender a mantener y modificar las condiciones térmicas en base a sus ocupantes, al igual que los sistemas se apagan cuando no hay usuarios, estos deben regular la temperatura en base a la presencia de estos y a su opinión. Las encuestas mencionadas en este capítulo son esenciales para conocer la zona de confort de cada usuario.

*Todo lo que se puede medir se puede mejorar*

Anónimo

# CAPITULO 16

## Sensores

Las razones por las que existe un menor rendimiento en muchos de los edificios actuales y sus sistemas relacionados con la energía son diversas, y en gran parte es causada por la insuficiente atención a la influencia del comportamiento de los ocupantes y su entorno.

En los edificios inteligentes es necesario implementar nuevas oportunidades para integrar el comportamiento humano en los sistemas, en especial los sistemas de climatización. Además, muchos investigadores están limitados en su investigación al no contar con herramientas de bajo coste que pueden proporcionar información a sus estudios.

En este capítulo se describe cómo crear su propio sensor de temperatura de globo y un conjunto de sensores que pueden ser utilizados para mejorar el estudio del confort.

Hoy en día, muchos dispositivos son además de costosos, poco flexibles, por esta razón, las investigaciones necesitan usar herramientas alternativas.

En el desarrollo de esta investigación, se propone el uso de las placas de los microcontroladores Arduino, éstas son de código abierto además de una alternativa económica y flexible. Éstas se conectan al software experimental estándar con una conexión USB o mediante la tecnología Wi-Fi. En la solución, un Arduino utiliza diversos sensores, este sistema permite la integración flexible de otros sensores

## 16. SENSORES

---

(temperatura del aire, la humedad, la calidad del aire, etc.). Cuando se utiliza la plataforma de microcontrolador Arduino de código abierto, se cosecha la creatividad de una gran comunidad de desarrolladores.

En este capítulo, se propone utilizar la plataforma Arduino microprocesador como una alternativa a los sistemas existentes, además esboza cómo el uso de la plataforma Arduino permite ampliar la caja de herramientas experimental para incluir otras medidas. Por lo tanto, se describe cómo el Arduino se puede utilizar como una plataforma para la medición y para investigar con un termómetro de globo. Además, este trabajo presenta los resultados de algunas pruebas realizadas entre los sensores de temperatura de globo con diferentes diámetros.

La temperatura media radiante ( $\overline{t_r}$ ) es uno de los parámetros meteorológicos más importantes que rigen el balance de energía humana. En la actualidad, existen diferentes métodos para obtener las  $\overline{t_r}$  en una cubierta o al aire libre [Thorsson et al., 2007]. Los investigadores del confort térmico y los diseñadores requieren de un método sencillo y fiable para estimar la temperatura media radiante, el termómetro de globo negro de 40 mm. proporciona una solución buena y barata.

### 16.1 Parámetros ambientales

Los parámetros ambientales más comunes son: temperatura del aire, temperatura media radiante, la velocidad del aire y la presión de vapor de agua en el aire. Además, hay tres parámetros personales: metabolismo, trabajo y aislamiento térmico de la ropa. Sin embargo, en los estudios y la investigación aplicada a los edificios, por lo general se utilizan diferentes índices ambientales. Los índices ambientales actuales se pueden dividir en tres categorías: directa, racional y empírica [Awbi, 2013].

- Directa: Estos índices se basan en la medición de un instrumento simple que responde a las variables ambientales en una manera similar a la de un humano. En esta categoría se puede ver el termómetro de globo, que es un buen predictor del efecto combinado de la temperatura, la radiación y el movimiento del aire en el cuerpo humano. La temperatura de globo responde a los cambios en la temperatura del aire, velocidad del aire y la temperatura radiante.



- Racional: Estos índices se basan en modelos de respuestas humanas, y consideran la termorregulación y los intercambios de calor entre el cuerpo y el medio ambiente. Estos modelos pueden ser utilizados para predecir la respuesta humana a ciertas condiciones ambientales, por ejemplo, la temperatura operativa, este índice combina el intercambio de calor por radiación y convección entre el cuerpo y el medio ambiente.
- Empírica: Estos índices se basan en un modelo de intercambio de energía entre el cuerpo humano y el medio ambiente, a diferencia de los otros; estos índices se basan en estudios validados por una gran muestra de población, ropa, actividad metabólica, una gama de condiciones ambientales y sensaciones térmicas (un ejemplo es el PMV mencionado anteriormente).

## 16.2 Termómetro de Globo

El termómetro de globo es el instrumento más comúnmente utilizado para la medición de la temperatura media radiante de un recinto. Fue introducido por Vernon en 1930 como un simple dispositivo para indicar el efecto de la radiación sobre el confort humano [Vernon, 1932]. Luego, en 1934, Bedford y Warner utilizaron para estimar la temperatura media radiante en relación con la temperatura del aire y el movimiento del aire [Bedford y Warner, 1934]. El globo estándar de Vernon tiene un diámetro de 150 mm. y un espesor de 0,4 mm., es una esfera de cobre negro hueca, con un termómetro colocado en el centro de la esfera.

Actualmente, un termómetro de globo puede ser utilizado dentro de los edificios para dos funciones:

- Para estimar la temperatura media radiante de una habitación, en este caso, también es necesario conocer una medición de movimiento de aire y la temperatura. Sin embargo, con esta medida, se prefiere un gran globo en este caso debido a su mayor respuesta a la radiación incidente [Humphreys, 1977].
- Para evaluar la calidez de una habitación respecto al confort humano. Para este fin, el globo debe ser de un tamaño que responde a la radiación y la

## 16. SENSORES

---

convección en proporciones similares a las del cuerpo humano. La temperatura global se mide utilizando una esfera, generalmente pintada de negro o gris para imitar la respuesta del cuerpo humano a la radiación térmica, y es comúnmente hoy en día de unos 40 mm. de diámetro. La derivación teórica de esto se puede encontrar en [Humphreys, 1977]; donde 40 mm. es más o menos el diámetro de una pelota de tenis de mesa. Se llevó a cabo una investigación, con el fin de obtener las respuestas relativas, de las esferas con diferentes diámetros, a la convección y a la radiación, con este propósito se examinaron los intercambios de calor entre las esferas y sus alrededores.

En los termómetros de globo, las esferas más pequeñas tienen la ventaja de un tiempo de respuesta más corto. El tiempo de respuesta del globo de Vernon con un termómetro de mercurio en el interior es bastante lento y necesita entre 20 y 30 minutos para alcanzar el equilibrio. Se alcanza el equilibrio cuando la ganancia de calor por radiación es igual a la pérdida de calor por convección y re-radiación, ya que tres componentes deben entrar en equilibrio: el propio globo, el aire contenido en ella y el termómetro. En [Nikolopoulou et al., 1999] se presenta una comparación entre cinco termómetros 40 mm. de diámetro de globo, de diferentes espesores y materiales, con el objetivo de reducir el tiempo de respuesta de menos de 4 minutos. Esto es adecuado para uso en exteriores, donde se requiere una respuesta rápida para recoger los rápidos cambios en el entorno. [Nikolopoulou et al., 1999] dijeron que es posible reducir el tiempo de respuesta del instrumento mediante la reducción de su capacidad calorífica. La transferencia de calor desde las paredes del globo hasta el sensor es rápida y no es un factor limitante. Las diferencias en las temperaturas de equilibrio de los materiales y las esferas de acrílico, se observan y se explican por la absorción selectiva de la superficie metálica ligeramente pintada. Las pelotas de ping-pong delgadas de acrílico, su robustez relativa y la necesidad de evitar una superficie metálica pintada, confirman que se trata de una buena opción para los termómetros de globo donde se requieren tiempos de respuesta de hasta unos 4 minutos.

### 16.3 Arduino, Hardware Open Source

El movimiento de software de código abierto ha tenido un enorme impacto en la tecnología y nuestra sociedad en los últimos años. Además, ha ayudado en la investigación académica y ha modificado la forma en que muchas empresas de alta tecnología hacen negocios. No existe una definición clara y ampliamente aceptada, sin embargo, una definición razonable es: Hardware abierto es un objeto (artefacto físico, ya sea eléctrico o mecánico) cuya información está disponible para el diseño, y es utilizable por el público de una manera que permite que cualquiera pueda hacer, modificar, distribuir y usar esa cosa [TAPR, 2007].

En [Seaman, 1998] se presentan tres requisitos para que algo sea calificado como “open hardware”:

1. La interfaz para el hardware deben ser expresamente público, por lo que el hardware se puede utilizar libremente.
2. El diseño del hardware debe hacerse público, para que otros puedan implementarlo y aprender de él.
3. Las herramientas utilizadas para crear el diseño debe ser libre, para que otros puedan desarrollar y mejorar el diseño.

Una de las ventajas del software de código abierto es que permite crear mecanismos para replicar un problema cuando se trata de hardware. En este capítulo se propone el uso de Arduino para una sensorización inteligente del edificio durante el proceso de investigación.

El Arduino [Arduino, 2013] es una plataforma de código abierto para la creación de prototipos de microcontroladores ATmega AVR. Los diseños de hardware están disponibles bajo la licencia *Attribution-Share Creative Commons*. También ofrecen las bibliotecas y herramientas de software bajo licencia LGPL y GPL. Parece que la adopción de un modelo de negocio de código abierto se ha traducido en un aumento de la innovación, y en general ha sido un éxito.

Como en un proyecto de hardware abierto, toda la placa de circuito y especificaciones de los componentes electrónicos, así como el software IDE, son de libre

## 16. SENSORES

---

acceso para cualquier persona que utilice o modifique éste. Por un lado, el microcontrolador está programado a través del entorno Arduino de desarrollo integrado (IDE), en el que el usuario crea las instrucciones del programa para operar sobre el microcontrolador y luego descarga el programa al microcontrolador. Por otra parte, se han desarrollado y producido sistemas por otros fabricantes privados de todo el mundo, para producir y ofrecer hardware compatible con Arduino y barato, estandarizado con una amplia oferta de características y capacidades. Investigadores de diferentes disciplinas han empezado a desarrollar e implementar con éxito los dispositivos basados en la plataforma Arduino. En [Hribernik et al., 2011] se presenta una discusión sobre el potencial de la aplicación de la Plataforma Arduino desde el punto de vista del bajo coste, de la facilidad de uso del microcontrolador y kits de sensores que facilitan la creación y en algunos casos ilustran las primeras experiencias de cómo con la plataforma Arduino se crean productos inteligentes.

### 16.3.1 La plataforma Arduino

Arduino es el nombre de una familia de placas de microcontroladores. Las placas son una combinación de un pequeño microprocesador que incluye una SRAM, una memoria flash y una EEPROM, junto con un grupo de canales de entrada/salida. Por lo tanto, estas placas tienen la misma estructura que los ordenadores personales comunes, pero su rendimiento es, por supuesto, sólo una fracción de aquellos. Para programar Arduino, se utiliza un entorno de programación simple, donde el código está escrito en un lenguaje simplificado similar a C, y se transfiere a la placa Arduino con un cable USB.

Varias características hacen de la familia Arduino una herramienta interesante como plataforma de medición. Arduino puede trabajar mientras está conectado a un PC u operar independiente con pequeñas baterías. Se conecta fácilmente mediante USB a un ordenador con Windows, Linux o Mac, y puede transmitir datos a través de un puerto serie virtual para estos sistemas operativos o puede utilizar tecnología inalámbrica (Xbee o Wifly).

[D'Ausilio, 2012] confirmó que las señales generadas por un Arduino eran constantes fiables en longitud y demora. Por esta razón, el Arduino puede funcionar

como un controlador fiable para valores experimentales, y se puede reemplazar el hardware más complicado como un controlador independiente.

### 16.4 La tecnología inalámbrica

La tecnología inalámbrica está cambiando la forma en la que se utilizan los sensores en los edificios. Su bajo coste, la facilidad para su instalación por ser dispositivos de detección que no requieren conexiones por cables, muestran una atractiva tecnología. Los sensores proporcionarán los datos necesarios para operar de manera rentable, administrar y mantener los edificios con el máximo rendimiento. La comunicación inalámbrica de datos a través de WiFi (o estándares IEEE 802.11) es habitual en los hogares, oficinas y espacios públicos, por este motivo, se recomienda utilizar Wifly, para enviar los datos a través de la red. La información puede ser enviada a través de HTML a cualquier base de datos en la red o ser almacenada en los servidores mundiales, como Xively [Xively, 2013] que es un servicio de base de datos online que permite a los desarrolladores conectar los datos derivados del sensor (por ejemplo, datos sobre la energía y el medio ambiente de los objetos, artefactos y edificios) con la web y construir tus propias aplicaciones basadas en esos datos.

En la actualidad, las salidas de los diferentes sistemas de transmisión inalámbricos, comparados en la tabla 16.1, destacan como Bluetooth (IEEE 802.15.1) tiene una transmisión inalámbrica de corto alcance, una tecnología que actualmente está incrustada en importante variedad de dispositivos comerciales, pero en muchos contextos no es fiable. Una solución alternativa es utilizar ZigBee (IEEE 802.15.4), que permite la creación de sistemas que son más pequeños y que consumen una menor potencia que Bluetooth o WLAN, mientras que al mismo tiempo es fiable. Sin embargo, son necesarios transceptores ZigBee en el edificio, lo cual no suele ser común. Por otro lado los transceptores WLAN (IEEE 802.11) son típicamente integrados en los ordenadores de mesa, portátiles, teléfonos móviles, etc., y en los edificios se suelen tener puntos de acceso inalámbrico. La desventaja es que tales sistemas también son típicamente más grandes, más caros, y consumen más energía.

## 16. SENSORES

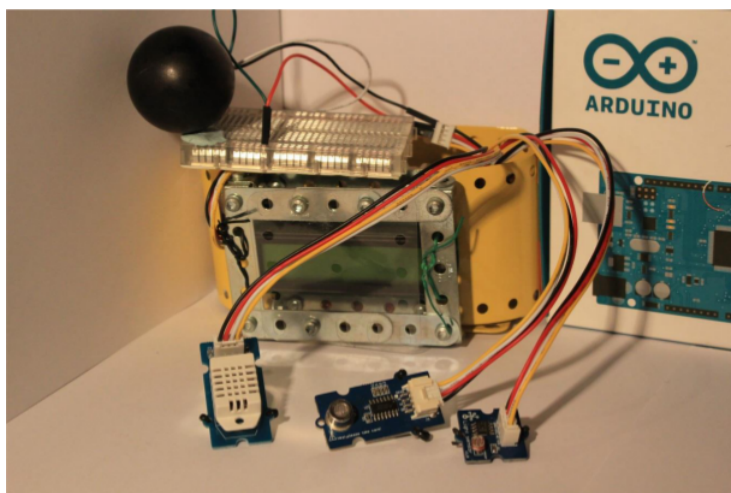
---

**Tabla 16.1:** Comparativa entre WLAN, Bluetooth y ZigBee.

	WLAN	Bluetooth	ZigBee
<b>Banda</b>	2.4, 3.6 and 5 GHz	2.4 GHz	2.4GHz, 868/915MHz
<b>Potencia</b>	500 mW	100 mW	30mW
<b>Vida de la batería</b>	horas	Días o meses	6 meses - 2 años
<b>Rango</b>	30-70 m	10-30 m	10-75 m
<b>Tasa de datos</b>	1-150 Mbps	1-3 Mbps	25-250 Kbps
<b>Tipo de red</b>	Ad hoc, P2P	Ad hoc, P2P, star	Mesh, ad hoc, star
<b>Seguridad</b>	WEP/WPA	128-bit encryption	128-bit encryption
<b>Transmisión</b>	10 ms	3 s	15 ms

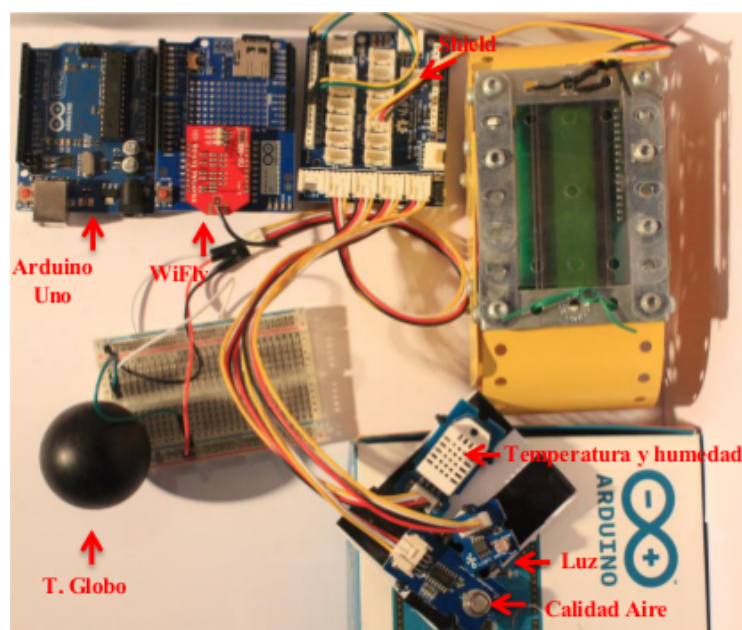
### 16.5 Sensores

A partir de la tecnología presentada, se pueden utilizar varios sensores para estudiar el confort de un edificio. En el apartado 16.6 se presenta como fabricar un termómetro de globo, por no existir en el mercado dicho dispositivo para esta tecnología. Sin embargo, existen otros sensores calibrados y seguros que pueden ser comprados, se presentan a continuación los sensores propuestos para esta investigación.



**Figura 16.1:** Sensores del sistema.

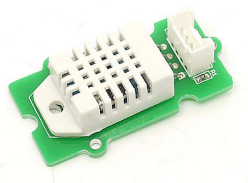
En las figuras 16.1 y 16.2 se presentan el conjunto de sensores necesarios para la medición e investigación de un entorno sobre el cual se quiere estudiar el confort.



**Figura 16.2:** Conjunto de sensores y placas utilizados.

### 16.5.1 Temperatura y humedad del aire

El sensor “Temperature and Humidity Sensor Pro” (Figura 16.3), es un sensor de alta precisión de temperatura y humedad. Se compone de un sensor capacitivo utilizado para medir la humedad relativa y un termistor de temperatura negativo (NTC) que se utiliza para medir la temperatura. Cada sensor se calibra en una sala de humedad precisa. Su pequeño tamaño y el consumo ultra bajo de energía lo convierten en una herramienta de hardware abierto de calidad. Además es capaz de transmitir una señal a 20 m. La precisión de este módulo puede llegar hasta 0,3 grados en la temperatura y el 2 % de la humedad relativa.



**Figura 16.3:** Sensor de temperatura y humedad.

## 16. SENSORES

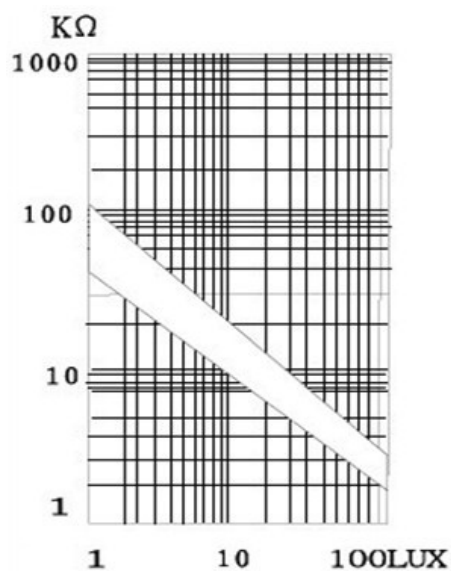
---

### 16.5.2 Luminosidad

El sensor de luminosidad (Figura 16.4), es un módulo que utiliza una fotorresistencia (GL5528) para detectar la intensidad de la luz del ambiente. Se basa en el principio de semiconductores de efecto fotoeléctrico. El sensor puede ser utilizado para detectar la intensidad de la luz ambiente. Sus fotocélulas son pequeñas, de bajo coste, baja potencia y fáciles de usar. Las fotocélulas son básicamente una resistencia que cambia su valor de resistencia dependiendo de la intensidad del brillo de la luz. Las variaciones de la luz pueden ser realmente grandes, este sensor no tiene una alta precisión, sin embargo, permite determinar los cambios de luz básicos, en la figura 16.5 se presenta la relación entre la resistencia y la luminosidad medida en LUX.



**Figura 16.4:** Sensor de luminosidad.

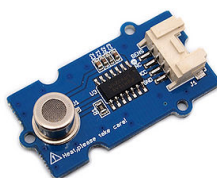


**Figura 16.5:** Luminosidad en función de la resistencia.



### 16.5.3 Calidad de aire

El sensor de calidad del aire (Figura 16.6) está diseñado para probar la calidad del aire en interiores. El principal gas detectado es el monóxido de carbono, alcohol, acetona, disolvente, formaldehído, amoníaco, insecticidas y otros gases ligeramente tóxicos. La señal del sensor es analógica. Con este sensor se puede calcular la tasa o aumento de tensión por unidad de tiempo, y luego juzgar el nivel de contaminación.

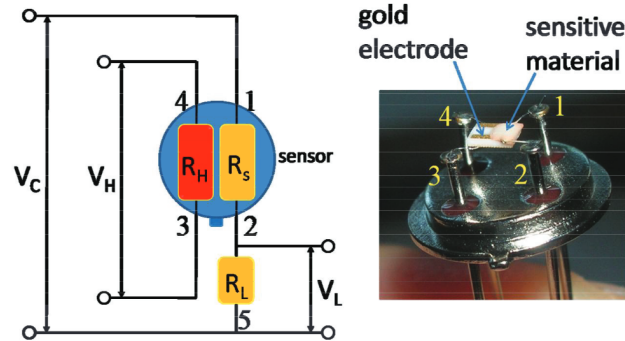


**Figura 16.6:** Sensor de calidad del aire.

Cuando el sensor se conecta, es necesaria una espera de 2 minutos, tiempo que necesita el sensor para precalentarse, a continuación, las pruebas se inician. Para lo cual se definen cuatro estados, el primero es alta contaminación con peligrosidad, el segundo es alta contaminación, el siguiente es de baja intensidad de contaminación, el último es el estado de “aire fresco”.

En la figura 16.7 se presenta el sensor de gas con estructura plana de cerámica. Como se muestra en la figura, una fuente de voltaje de corriente continua está conectada al cable calefactor de sensor de gas (3 y 4). Un voltaje de 5V se aplica con el fin de proporcionar una temperatura de funcionamiento elevada para el sensor de gas. Después de que el sensor se caliente se vuelve sensible. El circuito (1 y 2) está conectado con la resistencia de carga ( $R_L$ ), por lo general  $10k\Omega$ . La tensión de 5V se aplica para sobre 1 y 5. Cuando el sensor se expone a una pequeña cantidad reducida de los gases, la resistencia del sensor disminuirá. Y tensión ( $V_L$ ) entre la resistencia  $R_L$  aumentará, de esta forma, mediante la supervisión de  $V_L$  se puede detectar la calidad del aire.

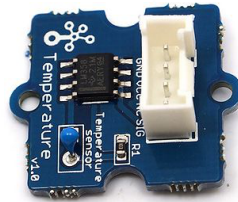
## 16. SENSORES



**Figura 16.7:** Estructura del sensor de calidad del aire.

### 16.5.4 Temperatura

También existen otros sensores de menor precisión. El sensor de temperatura (Figura 16.8) utiliza un termistor que devuelve la temperatura ambiente en la forma de un valor de resistencia, que se utiliza para alterar la tensión medida por un pin de entrada analógico. El rango de operación es de -40 a 125 grados centígrados.

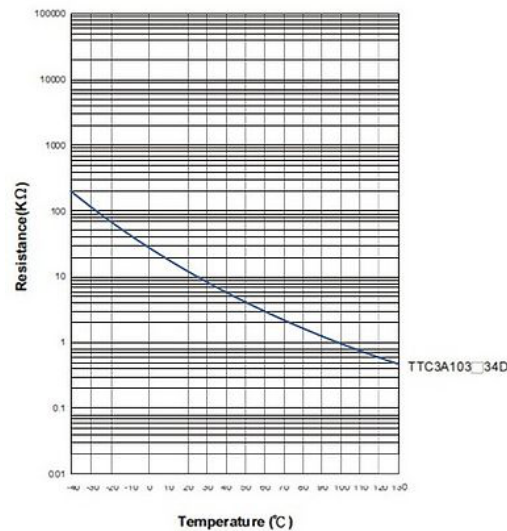


**Figura 16.8:** Sensor de temperatura.

A medida que la temperatura aumenta, el valor de la resistencia del sensor disminuye, como se observa en la figura 16.9.

La temperatura se define según la ecuación 16.1, donde B es una constante asociada al termistor, R es la resistencia que se quiere convertir en temperatura y  $R_{24^{\circ}C}$  es el valor de la resistencia del termistor a una temperatura de  $24^{\circ}C$ .

$$T = \frac{1}{\frac{\log(\frac{R}{R_{24^{\circ}C}})}{B} + \frac{1}{298,15}} - 273,15 \quad (16.1)$$



**Figura 16.9:** Resistencia frente a temperatura.

Sin embargo, existen muchas ecuaciones con las cuales calibrar este tipo de termistores, una interesante revisión es presentada por [Chen, 2009].

## 16.6 El termómetro de globo

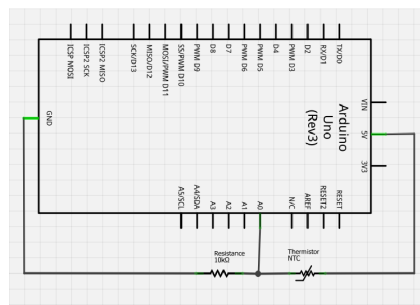
En este trabajo se presenta una comparativa de los termómetros de globo basados en Arduino. Se utiliza principalmente el modelo de referencia de la familia Arduino, Arduino Uno. Este modelo cuenta con 32 KB de memoria flash, funciona a 16 MHz, y cuenta con 14 entradas/salidas digitales y 6 pines de entrada analógica. Otros modelos, más grandes ofrecen más opciones de entrada y salida. Así también se utilizan otros modelos, como Arduino Mega.

Las placas se pueden conectar a los actuadores y sensores, ya sea de forma comercial o construida a partir de cero. Muchas extensiones de la placa pueden ser usadas, son los llamados shields, pequeñas placas adicionales que están conectadas a una placa Arduino. Por ejemplo, algunas shields dotadas de conexión inalámbrica (Wi-Fi o Bluetooth), mientras que otros permiten almacenar datos en tarjetas de memoria flash (ver figura 16.2).

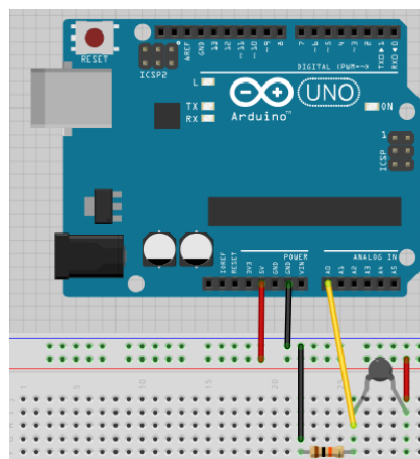
En la figura 16.10 se presenta un ejemplo sencillo de conexión aplicada a un Arduino Uno para la lectura de un termómetro de globo. El microcontrolador está co-

## 16. SENSORES

nectado a un PC a través de un cable USB. La conexión del circuito con el termómetro es simple. Se crea un divisor de tensión (también conocido como un divisor de potencia) es un circuito lineal que produce una tensión de salida ( $V_{out}$ ) que es una fracción de su voltaje de entrada ( $V_{in}$ ). Este divisor de tensión está compuesto por dos resistencias, en serie, pero en este caso, se utiliza una resistencia y un termistor, donde ambos tienen las mismas características de resistencia a una temperatura de  $24^{\circ}C$ . La entrada de la señal a la placa Arduino, se realiza a partir de una toma de corriente en el medio de las dos resistencias. Se obtiene la tensión de entrada que depende de la temperatura del medio ambiente del termistor. En nuestro caso, el interior de una bola negra de un diámetro dado. La figura 16.11 muestra el esquema básico.



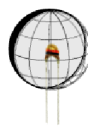
**Figura 16.10:** Esquema del circuito.



**Figura 16.11:** Esquema.

### 16.6.1 El sensor

El sensor de temperatura de globo (Figura 16.12), se compone de una esfera negra de pared delgada en el centro de la cual se coloca un sensor de temperatura, un termómetro de resistencia. Para aumentar la capacidad de absorción de la esfera, se ennegrece la superficie exterior, comúnmente por una capa de pintura de color negro mate.



**Figura 16.12:** Termómetro de globo.

En los experimentos, siempre existe un problema en la toma de mediciones en un entorno térmico, debido a que la presencia del objeto o artefacto afectará sobre el valor inmediato del propio microclima. Por esta razón, es necesario mantener una distancia. El termómetro de globo cerca del sujeto probablemente recogerá la radiación del cuerpo del sujeto, así como de las superficies de la habitación. El movimiento del aire cerca del sujeto se verá afectado por la presencia de la materia y así sucesivamente. El termómetro de globo necesita de algunos minutos para alcanzar el equilibrio. Hay algo de mérito en ello en un entorno variable, ya que suaviza las fluctuaciones de temperatura durante un período. La constante de tiempo se puede determinar experimentalmente [Humphreys, 1974].

### 16.6.2 Modularidad y costes

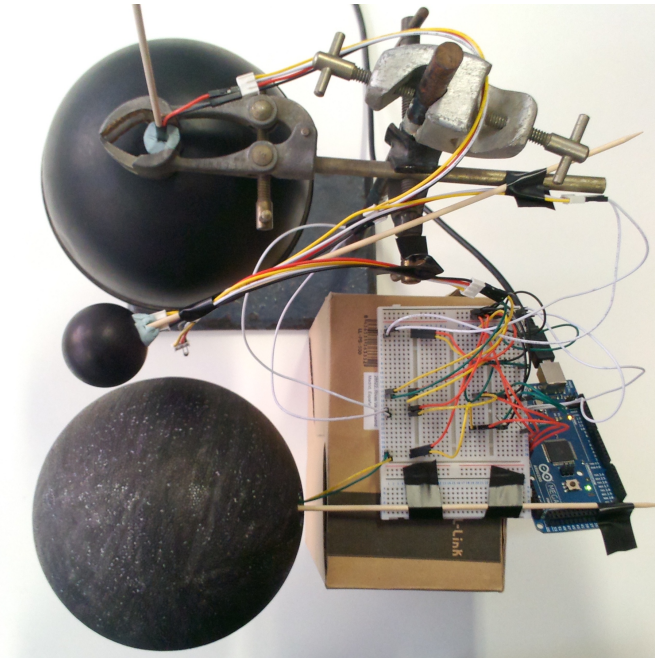
El código del microcontrolador se puede modificar fácilmente con la conexión USB para otras aplicaciones. El coste total para construir un prototipo básico es de aproximadamente 25 €. Si un equipo no está disponible cerca del dispositivo de almacenamiento de datos local, la tarjeta microSD se puede agregar por 18 € más el precio de la memoria. Además, si se desea una conexión inalámbrica en lugar del cable USB, el Wi-Fi se puede agregar por 35 €. El termistor, resistencia, cable y una pelota de ping-pong es menos de 5 €. Un dispositivo básico comercial suele costar más de 200 €, y la capacidad de adaptación a la investigación es muy limitada, especialmente para los estudios en tiempo real.

## 16. SENSORES

---

### 16.6.3 Experimento

Un termómetro de globo, o bien puede hacerse por uno mismo utilizando una pelota de ping-pong negra o gris con un dispositivo de medición de temperatura en su interior, o se puede comprar ya hecho. El material del que está hecho el globo y su espesor afectará el tiempo que tarda en llegar al equilibrio. En la figura 16.13 se presentan los sensores aplicados en el experimento, se observa el termómetro de globo de cobre de 150 mm., el termómetro fabricado con una pelota de ping-pong de 40 mm., un termómetro de 150mm. de material aislante sólido y un termómetro que toma la temperatura del aire.



**Figura 16.13:** Termómetros de globo del experimento.

El tiempo de respuesta también se ve afectado por las propiedades del sensor de temperatura. El sensor debe estar en el centro de la esfera y el punto de entrada de la varilla o alambre debe ser hermético, ya que el aire que fluye en el globo puede afectar al aire o balance de temperatura radiante. En los experimentos, el instrumento está suspendido dentro de un recinto y transcurre suficiente tiempo para alcanzar el equilibrio entre la convección y la transferencia de calor radiante procedente de la superficie de la esfera.



## 16.6 El termómetro de globo

En las figuras 16.14 y 16.15, se presenta nuestro sistema durante el experimento en una sala de trabajo de la *Sir John Cass Faculty of Art, Architecture and Design* de la *London Metropolitan University*. Situado en el centro de una sala, suspendidos y alejados de elementos que desprendan calor.



**Figura 16.14:** Temperatura del exterior de un termómetro de globo en el inicio del experimento.

La figura 16.16, representa un cambio de las condiciones climáticas del entorno por aumento de la radiación, este cambio se mantuvo durante horas. El cambio es

## 16. SENSORES

---

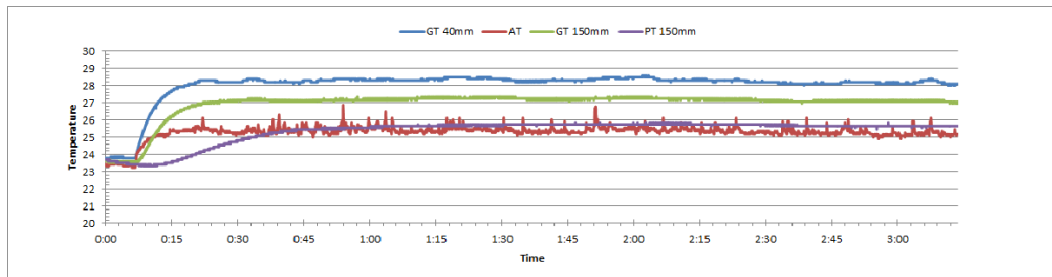


**Figura 16.15:** Termómetros de globo y lugar del experimento.



## 16.6 El termómetro de globo

un aumento de 1,5 grados en la temperatura del aire, y más de tres grados de la radiación absorbida en la temperatura de globo. Por otra parte, la figura aparece un cuarto sensor, que está dentro de una esfera de material aislante sólido que se ve afectado sólo por convección.

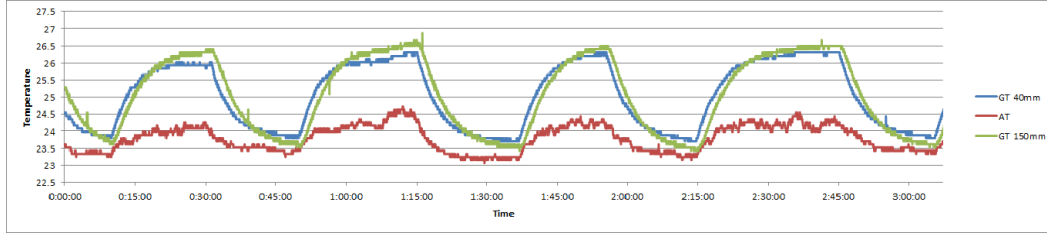


**Figura 16.16:** Comparativa: GT 40mm. (150mm.) es la temperatura de un termómetro de globo de 40 mm. (150mm.) de diámetro, AT es la temperatura del aire, PT 150mm. es la temperatura de una esfera de 150 mm. de diámetro de material aislante sólido.

En la figura 16.16 se muestra que para temperaturas de 24 grados, los sensores tienen un error de menos de la mitad de un grado, sin embargo, mediante el cambio de las condiciones, hay una diferencia de alrededor de un grado entre el globo de 40 mm. y el de 150 mm. de diámetro. Esta diferencia se produce por la influencia relativa de la velocidad del aire y la respuesta a la radiación. Dependiendo del valor de transferencia de calor radiante y convectivo, la temperatura de globo se encuentra entre la temperatura media radiante de la caja y la temperatura del aire que rodea al globo. Cuanto menor sea el diámetro de la esfera, mayor es el efecto de la temperatura del aire y velocidad del aire, reduciendo de este modo la exactitud de la medición de la temperatura media radiante. Aunque la norma ISO 7726 [Standard, 2002] recomienda una esfera de 150 mm. de diámetro, en general, con las esferas de medición tan pequeñas como las de 40 mm. (pelota de ping-pong) se han producido resultados similares a los obtenidos a partir de una esfera de 150 mm. de diámetro, un ejemplo es presentado en la figura 16.17.

El termómetro de globo necesita algunos minutos para alcanzar el equilibrio. Hay algo de mérito en ello en un entorno variable, ya que suaviza las fluctuaciones de temperatura durante un período. La constante de tiempo se puede determinar experimentalmente [Humphreys, 1974].

## 16. SENSORES



**Figura 16.17:** Comparativa: GT 40mm. (150mm.) es la temperatura de un termómetro de globo de 40 mm. (150mm.) de diámetro, AT es la temperatura del aire.

Es importante asegurarse de la posición y nivel del instrumento, de modo que la distancia desde el instrumento a cada sujeto o artefacto no se vea afectada, ya que la presencia del objeto o artefacto afectará el valor del microclima. Por esta razón, es necesaria una distancia. El termómetro de globo cerca del sujeto probablemente recoger la radiación del cuerpo del sujeto, así como de las superficies de la habitación. El movimiento del aire cerca del sujeto se verá afectado por la presencia de la materia y así sucesivamente.

El principio detrás del termómetro de globo es el equilibrio de transferencia de calor por convección y radiación desde la superficie de la esfera. La temperatura media radiante,  $\bar{t}_r$ , se puede expresar en términos de la temperatura del aire,  $t_a$  y la temperatura de globo,  $T_g$ , mediante la expresión 16.2.

$$\bar{t}_r = \left[ (t_g + 273)^4 + \frac{0.25 \cdot 10^8}{\epsilon_g} \left( \frac{|t_g - t_a|}{D} \right)^{\frac{1}{4}} (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (16.2)$$

donde:

$t_g$  = es la temperatura de globo

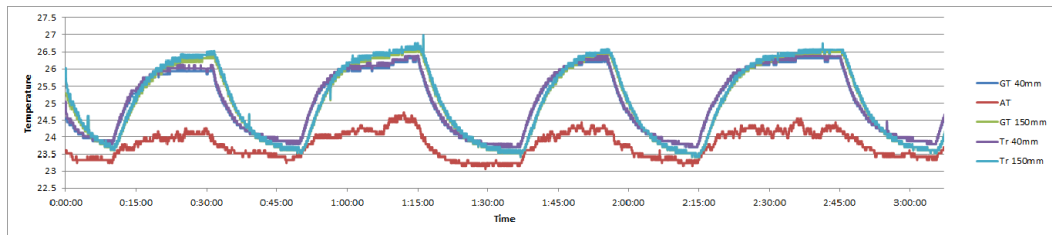
$t_a$  = es la temperatura del aire

$D$  = es el diametro del globo (en metros)

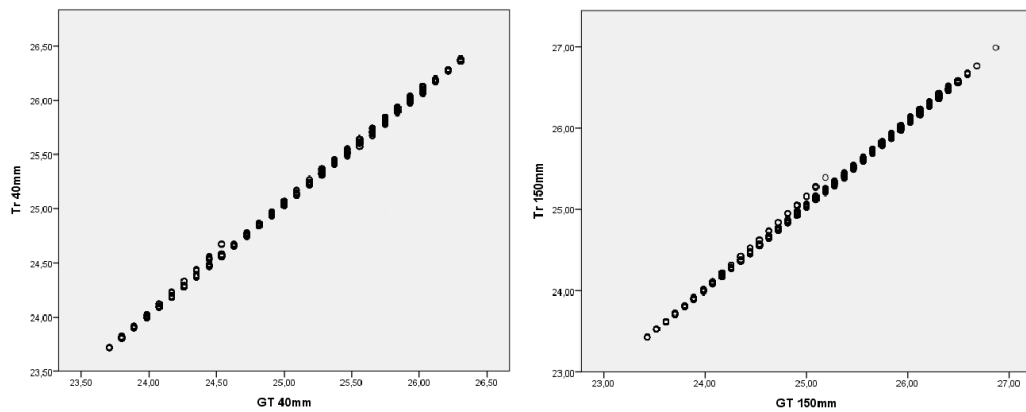
$\epsilon_g$  = es el coeficiente de medio de emisión de un globo negro mate (0,95)

Como se muestra en la gráfica 16.18, la temperatura radiante y la temperatura del globo son muy similares. En el gráfico 16.19, se observa más claramente que no existe una variación significativa, la diferencia entre la temperatura de globo y la temperatura radiante, es de  $0,01^\circ C$  para el globo de 40 mm., y de  $0,27^\circ C$  de media para un globo 150 mm., como se observa en los experimentos.

## 16.6 El termómetro de globo



**Figura 16.18:** Comparativa: GT 40mm. (150mm.) es la temperatura de un termómetro de globo de 40 mm. (150 mm.) de diámetro, AT es la temperatura del aire,  $T_r$  40mm. es la temperatura radiante de un globo de 40 mm. de diámetro.



**Figura 16.19:** Comparativa entre el temperatura de globo (GT) y la temperatura radiante ( $T_r$ ) con un diámetro de globo negro de 40 mm. (izquierda) y 150 mm. (derecha)

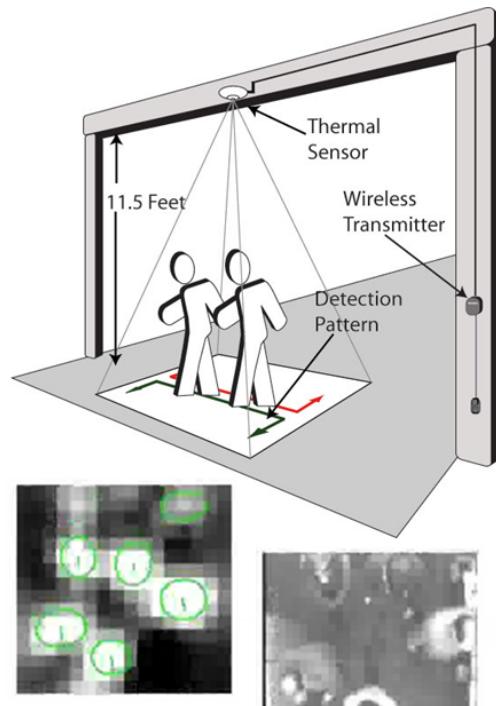
## 16. SENSORES

---

### 16.7 Mejorar futuras

En la actualidad, cuando se piensa en los edificios más modernos, se piensa en edificios que tienen sensores de energía, incendios, ocupación, luz, etc. Además de los sensores anteriormente abordados, hay sensores de contacto aplicados a las ventanas o sensores de movimiento.

Una nueva posibilidad es la aplicación de sensores de conteo de personas, con los cuales se permite conocer cuántas personas se encuentran en una sala de oficinas. Un transmisor inalámbrico y un sensor termal o dos sensores de barrera permiten diseñar este contador de personas. Las aplicaciones del número de personas asociadas al confort varían desde la toma de decisión de la temperatura en base al número de personas y área de las zonas de estudio, a la toma de decisiones en base a encuestas como se vio en el capítulo 15. La figura 16.20 representa una idea de cómo puede ser aplicada esta idea.



**Figura 16.20:** Ejemplo de sensor para contabilizar personas.

### 16.8 Conclusiones

Hoy en día, se necesita almacenar los datos de los grandes edificios y de las diferentes partes del mismo. Además, se necesitan herramientas baratas y eficientes, para replicar los experimentos por la comunidad científica. El hardware abierto permite crear las mismas herramientas para conectar numerosos sistemas, convirtiéndose ésta en la solución más económica. La fabricación de estos sensores se puede hacer fácilmente.

En este capítulo se han presentado los sensores que son necesarios para la metodología que se ha desarrollado. Ésta está basada en código y hardware abierto, donde la tecnología inalámbrica aporta un valor añadido a la transmisión de los datos. A parte, se ha desarrollado un estudio sobre el termómetro de globo. La temperatura de globo negro, hasta ahora, se ha medido con instrumentos caros, o que no permite generar y almacenar datos en línea en tiempo real. La literatura se ha revisado y se ha experimentado con este tipo de termómetros de globo. Se ha observado que son fiables y que gracias a microcontroladores tales como Arduino su utilidad se extiende a múltiples investigaciones. Por último, se confirma el uso del termómetro de globo con el tamaño conveniente de 40 mm., el coste de fabricación y la velocidad de reacción son similares en el globo de 150 mm., por lo que se confirma este tamaño como la mejor solución.



*Cuando tienes media manzana, tienes tanto una manzana como no la tienes. La media manzana impide una descripción de todo o nada. La media manzana es una manzana borrosa.*

Bart Kosko

## CAPITULO 17

# **La lógica difusa para la detección de configuraciones climáticas asociadas al confort**

La finalidad de esta investigación es la generación de modelos personalizados de confort adaptativo para mejorar la eficiencia energética de edificios. Frecuentemente los sistemas de climatización de los edificios disponen de un sistema de control, pero la información de la que dispone dicho sistema de control para modificar sus condiciones de operación es muy limitada. Asimismo sucede que el dispositivo de control sigue una ley de modificación que es estándar y que, por tanto, no ha sido comprobada ni verificada en dicho edificio. En consecuencia es frecuente que el grado de satisfacción de los usuarios de un edificio respecto de las condiciones de confort térmico y de calidad de aire interior del mismo sea bajo.

El sistema desarrollado consiste en un modelo basado en la información que los usuarios proporcionan sobre su nivel de bienestar, y en base a esta información aporta un elemento para la decisión que el sistema debe tomar a la hora de ejecutar los sistemas o leyes de control que rigen el edificio, con la mayor eficiencia.

## 17. LA LÓGICA DIFUSA PARA LA DETECCIÓN DE CONFIGURACIONES CLIMÁTICAS ASOCIADAS AL CONFORT

---

### 17.1 Introducción

El confort de varias salas es uno de los aspectos en constante investigación para el desarrollo de edificios inteligentes [Sierra et al., 2005]. Como se ha observado anteriormente (Tablas 14.5 y 14.6), existen muchas investigaciones centradas en cómo alcanzar o mantener la temperatura de una sala en base al índice PMV, sobre el que muchos autores son críticos [Van Hoof, 2008], y otras basadas en desarrollar sistemas que ahorran energía fijando los valores de temperatura y humedad que se quieren mantener.

Tras la revisión de los sistemas de control avanzados existentes, basados en el ahorro de energía y la gestión del confort en edificios, es clara la necesidad de dotar a estos sistemas de la capacidad de decisión suficiente para actuar sobre el confort ahorrando la mayor cantidad de energía posible. No obstante, existen situaciones para las cuales maximizar el confort debe prevalecer sobre maximizar el ahorro.

El aire acondicionado de un sistema central proviene de un equipo que filtra, calienta o enfría el aire y corrige la cantidad de humedad necesaria. Éste se envía por conductos a los diversos pisos del edificio, extrayéndose una parte del aire viciado e inyectando porciones de aire nuevo mediante manejadores. Pero cuando en la salas se producen peticiones dispares de temperatura es necesario producir centralmente más (o menos) temperatura para que todas las necesidades sean cubiertas. Ajustar el confort para maximizar el ahorro puede suponer una pérdida de la calidad en el confort; en cambio, maximizar el confort durante un periodo de tiempo para permitir la adaptación de los usuarios, esperar y reducirlo a valores de maximización del ahorro puede permitir mejorar la calidad y aceptación de este ahorro. En este sentido, como se ha observado, algunos autores muestran estudios en los cuales pequeños aumentos en el porcentaje de personas disconformes (PPD) pueden suponer un ahorro considerable (13 %) en la energía consumida [Magnier y Haghighat, 2010].

En este contexto, cabe destacar el trabajo de [Marinakis et al., 2013], que además de analizar el perfil energético de un edificio en base a una metodología y una herramienta propuesta que integra escenarios de control utilizando técnicas de optimización que minimizan el consumo y racionaliza el uso de la energía del sistema HVAC. Marinakis introduce dos conceptos, tras dividir en dos períodos de



tiempo diferentes la rutina de un edificio, se define el término de horas pico (*Peak hours*), cuando la temperatura deseada es controlada por el usuario final, de forma que cuando la temperatura excede la deseada por los ocupantes, las unidades HVAC se establecen en una operación periódica de 20 min (encendido-apagado), y cuando la temperatura del edificio es menor que la temperatura de control, todas las unidades se apagan. Igualmente, se definen las horas no pico (*Non peak hours*) cuando la temperatura del edificio es mayor que la temperatura programada por el usuario, y todas las unidades están encendidas, mientras que cuando el valor es pequeño, todos los equipos están apagados. Este concepto, puede ser conectado con las encuestas para tener en cuenta las horas pico en un edificio.

También se debe tener en cuenta que existen situaciones en las cuales debe prevalecer el confort sobre el ahorro energético, ya que los usuarios necesitan adaptarse a los cambios de temperatura producidos por la variación en la ocupación del edificio, la baja temperatura corporal en los momentos iniciales del día [Almirall y Marcet, 1995] tras desayunos y comidas, etc. son hechos que afectan a las sensaciones térmicas humanas que suelen darse en conjunto.

En este capítulo se desarrolla y pretende mostrar una metodología para identificar patrones de comportamiento que puedan aportar información a considerar por un sistema que tome decisiones. Se trata de identificar tres estados necesarios en un sistema: maximizar confort, mantener confort y maximizar ahorro.

## 17.2 Diseño del sistema basado en la lógica difusa

Como se ha observado anteriormente, en múltiples aplicaciones de la industria, se puede observar como la lógica difusa es una herramienta basada en la acción. En el caso del confort los usuarios realizan acciones intencionales cuya motivación sólo es conocida realmente por ellos, y de manera indirecta es conocida por el sistema a partir de un cuestionario de respuestas imprecisas.

El objetivo principal del diseño es proporcionar un sistema de detección fiable pero a la vez de fácil implementación. Esta propuesta metodológica es aplicada porque se desean tomar decisiones que no estén basadas en el conocimiento de actuaciones en el pasado, que otras técnicas como las redes neuronales podrían proporcionar, sino en un instante anterior del espacio temporal.

## **17. LA LÓGICA DIFUSA PARA LA DETECCIÓN DE CONFIGURACIONES CLIMÁTICAS ASOCIADAS AL CONFORT**

---

La búsqueda de patrones situacionales para la obtención de información útil en la toma de decisiones sugiere el empleo de técnicas de inteligencia artificial. La lógica difusa destaca por su sencillez y fácil aplicación y es especialmente adecuada para la conjunción de variaciones de demanda de muy diversas características. Esta técnica consiste en una serie de reglas generales o directrices definidas de forma que el problema que se pretende resolver no se corresponde unívocamente con un modelo determinado de lógica difusa, de ahí su versatilidad en cuanto a implementaciones y rendimiento [Fernández et al., 2009]. Aun así, como es lógico, todo sistema basado en lógica difusa presenta características parecidas: Son sistemas robustos, necesitan poca información de entrada, y su proceso suele constar de las siguientes tres fases: fuzzification (conversión del valor de las variables de entrada en valores “difusos”), proceso de inferencia basado en reglas lógicas; y defuzzification (conversión del valor de las variables difusas y toma de decisión).

Las reglas aplicadas en los sistemas que emplean la lógica difusa son reglas expresadas por los expertos que sólo son aproximadas, pues el modelado del conocimiento de la lógica difusa no es metódico, sino se propone a través de la experiencia del experto.

En la actualidad existe un estándar para implementar lógica difusa, especialmente para el control difuso, denominado FCL (Fuzzy Control Language, IEC-1131p7) [Cingolani, 2010] que facilita el desarrollo junto a librerías de diferentes lenguajes de implementación.

### **Modelo**

Mediante sensores similares a los presentados en el capítulo 16 y gracias a las herramientas tecnológicas actuales (PCs, teléfonos, móviles, PDAs, etc.) se puede personalizar el confort y detectar qué usuarios valoran éste, dónde y en qué medida. Además, se pueden registrar los cambios deseados sobre el estado de las salas.

El objetivo del modelo es proporcionar un sistema fiable y a la vez de fácil implementación, de ahí la sencillez de las entradas requeridas.

### 17.2.1 Parámetro de diseño

$t$ : Periodo de tiempo tras el cual se realiza el análisis y posterior toma de decisión respecto al tipo de configuración climática.

### 17.2.2 Variables iniciales del modelo

Como se ha observado anteriormente, [ASHRAE, 2008] define un rango de valoraciones que podría dar un usuario: calurosa (muy cálida), cálida, ligeramente cálida, neutra, ligeramente fría, fría y muy fría. Este rango de valores es muy extenso, teniendo el mismo valor algunas de las componentes en cuanto al patrón que se desea buscar. Por ello, se reduce este rango a tres componentes que son: disconforme por calor, conforme y disconforme por frío.

Definiéndose las siguientes variables:

- $v_{dc}, v_c, v_{df}$ : Valoración total durante el periodo  $t$  de los usuarios. La valoración puede ser: disconforme por calor, conforme y disconforme por frío.
- $v'_{dc}, v'_c, v'_{df}$ : Variación de la valoración total durante el periodo  $t$  y el periodo  $t - 1$ .
- $o$ : Porcentaje de ocupación en el periodo  $t$ .
- $o'$ : Variación de la ocupación durante el periodo  $t$  y el periodo  $t - 1$ .

Las variaciones de las valoraciones totales durante dos periodos diferentes consecutivos se calculan en las ecuaciones 17.1 y 17.2.

$$v'_{\alpha} |_{\Delta t} = \frac{v_{\alpha} |_{\Delta t} - v_{\alpha} |_{\Delta t-1}}{v_{\alpha} |_{\Delta t-1}} \quad (17.1)$$

$$o'_{\alpha} |_{\Delta t} = \frac{o_{\alpha} |_{\Delta t} - o_{\alpha} |_{\Delta t-1}}{o_{\alpha} |_{\Delta t-1}} \quad (17.2)$$

## 17. LA LÓGICA DIFUSA PARA LA DETECCIÓN DE CONFIGURACIONES CLIMÁTICAS ASOCIADAS AL CONFORT

---

### 17.2.3 Conversión de las variables a variables difusas

Según la posición relativa de las variables definidas previamente respecto de la valoración esperada durante el intervalo, cada variable se divide en términos porcentuales en tres componentes diferentes.

Así, las valoraciones de los usuarios durante el periodo  $t$  se representan por tres componentes que las definen, en cuanto a cantidad total se refiere:

- $v_p, v_m, v_g$ : Componente de conjunto pequeño, mediano y grande de usuarios, respectivamente.

En lo que respecta a la variación, tanto en sentido positivo como negativo, del número de usuarios que valoran entre dos periodos consecutivos, también se divide cada parámetro en tres partes o componentes porcentuales según el signo de la variación entre periodos:

- $v'_n, v'_z, v'_p$ : Variación de las valoraciones negativa, nula y positiva respectivamente.

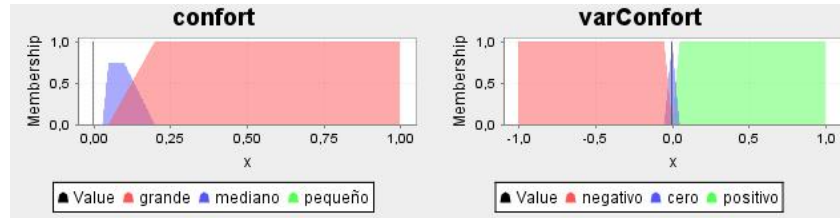
La cuantificación exacta de los componentes de cada una de las variables se rige según las funciones de pertenencia (membership) mostradas en las figuras 17.1, 17.2 y 17.3.

En la figura 17.1 se presenta la función de pertenencia del confort y la variación de éste. La consideración de pertenencia como grupo pequeño en el confort se ha despreciado y en el grupo mediano se ha devaluado. La razón de este cambio se debe a que los usuarios no están obligados a indicar que están en una situación confortable mientras que usan el sistema cuando no hay confort. Téngase en cuenta que si este cambio no se realizase el sistema daría el mismo valor a los disconformes que a los conformes que han decidido responder.

En las figuras 17.1, 17.2 y 17.3 la elección del valor que toma como pequeño a un grupo se realiza en base a un porcentaje. En el estudio de Fanger [ASHRAE, 2008] se recomienda que no se sobrepase el 10 % de insatisfechos y se sugieren rangos confortables a partir de menos del 20 % de personas insatisfechas. Por tanto son valores que definen lo considerable del tamaño y el sentido de las valoraciones.

También la ocupación total de usuarios durante el periodo  $t$  se representa por tres componentes que la definen en cuanto a cantidad total se refiere:

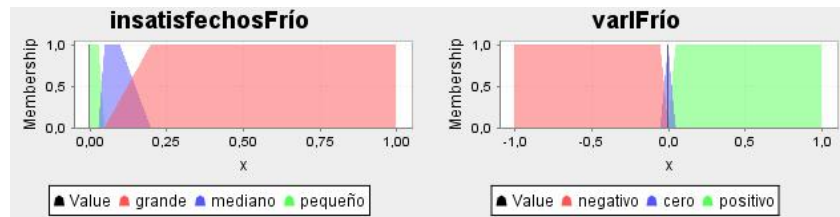
## 17.2 Diseño del sistema basado en la lógica difusa



**Figura 17.1:** Funciones de pertenencia del confort y la variación éste.



**Figura 17.2:** Funciones de pertenencia cuando no hay confort por calor y la variación éste.



**Figura 17.3:** Funciones de pertenencia cuando no hay confort por frío y la variación éste.

- $o_b, o_m, o_a$ : Componente de ocupación baja, mediana y alta, respectivamente.

En lo que respecta a la variación (tanto ascendente como descendente) de masa de usuarios entre dos periodos consecutivos, también se divide cada parámetro en tres partes o componentes porcentuales según el signo de la variación entre periodos:

- $o'_n, o'_z, o'_p$ : Variación de la ocupación negativa, nula y positiva, respectivamente.

La cuantificación exacta de los componentes de cada una de las variables se rige según se muestra en la figura 17.4.

## 17. LA LÓGICA DIFUSA PARA LA DETECCIÓN DE CONFIGURACIONES CLIMÁTICAS ASOCIADAS AL CONFORT



**Figura 17.4:** Funciones de pertenencia de la ocupación y la variación ésta.

### 17.2.4 Proceso de inferencia basado en reglas lógicas

Una vez obtenidas las tres componentes de cada variable, se calcula una serie de reglas lógicas teniendo en cuenta la variación respecto al periodo anterior:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{R1: } v_{gdc} \ \&\& \ v'_{pdc} \ \&\& \ o_a \ \&\& \ o'_p \text{ entonces Salida} = \text{confort} \\ \text{R2: } \dots \\ \dots \end{array} \right. \quad (17.3)$$

La regla R1 indica que se debe dar preferencia al confort si la ocupación del edificio es alta, su variación es positiva (están llegando usuarios), el número de usuarios disconformes por calor es grande y su variación es también positiva. En la regla, el producto lógico  $\&\&$  representa el mínimo entre los cuatro factores. El significado de confort, neutro y ahorro se utiliza para indicar si existe un cambio considerable del confort a nivel general, y representan la configuración a la que debe de dar preferencia el sistema.

Una vez obtenido el valor de cada regla, se calcula la "fuerza" de las componentes confort, neutro y ahorro mediante la raíz de la suma cuadrática de todas las reglas asociadas a cada una de ellas:

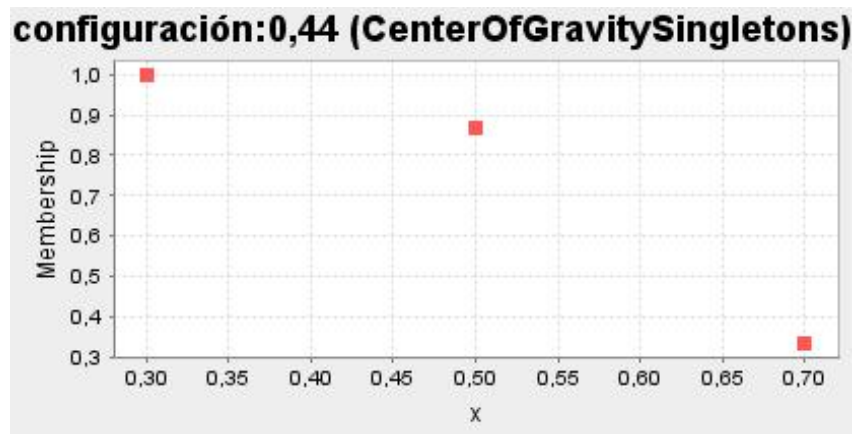
$$\text{fuerza}_{\text{confort}} = \sqrt{\sum_i R_i^2}, \forall R_i \in \text{confort} \quad (17.4)$$

### 17.2.5 Conversión del valor de las variables difusas y toma de decisión

Para poder tomar una decisión sobre qué demanda debe prevalecer (la de los usuarios o la de ahorrar por parte de un sistema central) es necesario transformar los

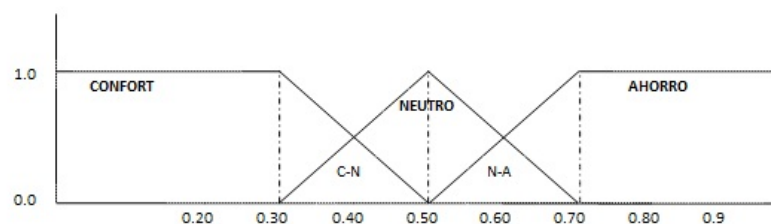
## 17.2 Diseño del sistema basado en la lógica difusa

resultados anteriores del proceso de inferencia en un solo resultado interpretable matemáticamente en forma de probabilidad. Un ejemplo de representación de cada una de las fuerzas se presenta en la figura 17.5, que es el resultado tras una variación de crecimiento positivo de la ocupación hasta el 31 %, mientras las valoraciones por confort y calor se mantienen a cero, y las valoraciones por insatisfacción por frío aumentan al 6 %, por lo que las reglas dan pertenencia 1 al confort, 0,87 a neutro y 0,33 en ahorro.



**Figura 17.5:** Fuerza de los centros.

Donde 0,3, 0,5 y 0,7 representan, respectivamente, los “centros” confort (C), neutro (N) y ahorro (A) de las funciones de pertenencia mostradas en la figura 17.6.



**Figura 17.6:** Funciones de pertenencia.

Se pondera cada centro mediante la fuerza de la componente respectiva (calculada anteriormente en el proceso de inferencia) y se calcula la media:

## 17. LA LÓGICA DIFUSA PARA LA DETECCIÓN DE CONFIGURACIONES CLIMÁTICAS ASOCIADAS AL CONFORT

$$\text{Ponderación} = \frac{([C.\text{centro}] \cdot [C.\text{fuerza}] + [N.\text{centro}] \cdot [N.\text{fuerza}] + [A.\text{centro}] \cdot [A.\text{fuerza}])}{[C.\text{fuerza}] + [N.\text{fuerza}] + [A.\text{fuerza}]} \quad (17.5)$$

En la figura 17.7 se presenta el valor de la solución de la función de pertenencia de salida para el caso mostrado en la figura 17.5, se obtiene el centro de gravedad asociado a los comportamientos que se definen; es decir, el punto de referencia respecto a los centros que representan hallarse ante Confort, Neutro o Ahorro. De este punto se deduce el patrón existente en el periodo analizado. Además como no sólo se tiene en cuenta el tamaño del flujo sino la variación de éste respecto al periodo anterior, mediante la elaboración cuidadosa de las reglas, se puede no sólo detectar el patrón de confort sino también predecirlo para el periodo siguiente con una probabilidad de error muy pequeña. Todo ello utilizando la menor cantidad de información posible, habida cuenta de que no se conoce ni la temperatura, ni las particularidades de cada usuario. Las reglas lógicas de decisión, si se detectasen varios tipos, darían como respuesta la de más alta probabilidad.

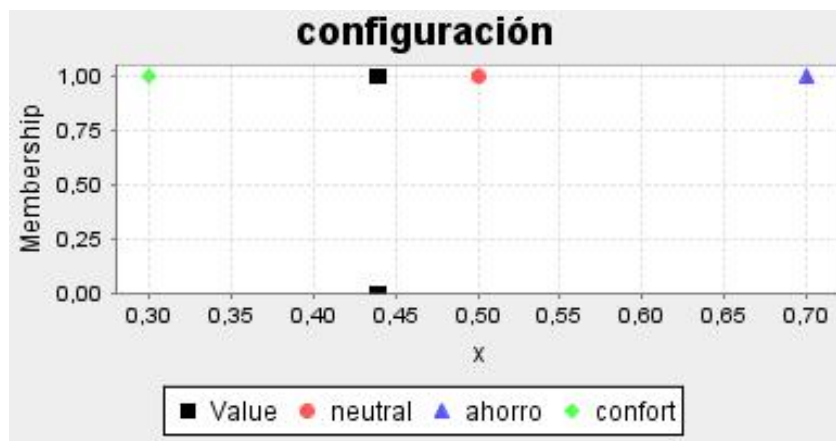


Figura 17.7: Salida.

### 17.2.6 Obtención de datos basada en cuestionarios subjetivos vía web

Las definiciones y conclusiones de partida sobre la aplicación de cuestionarios subjetivos online, se pueden revisar en el capítulo 15. En esta versión del sistema se ha



## 17.2 Diseño del sistema basado en la lógica difusa

tomado como base la norma internacional ISO 10551 [AENOR, 2002] referida a la influencia del ambiente térmico empleando escalas de juicio subjetivo. Aun así, pese a las peticiones de los encuestados, todo sistema debe estar limitado a ciertas normas ya sean por decisión del ergónomo experto o por las leyes o normativas de un país. La encuesta se realizó en base a siete juicios de valores, tres basados en el estado térmico personal (evaluación perceptiva, afectiva y de preferencia térmica), dos basados en el ambiente térmico (aceptabilidad personal y tolerancia personal) y dos en base al estado emocional (grado de estrés y estado de ánimo). Siendo la información de la evaluación perceptiva la utilizada en el sistema desarrollado. En la tabla 17.1 se presenta el cuestionario principal.

Estado térmico personal	
Perceptivo	¿Cómo valora la sensación térmica?
	Calurosa, cálida, ligeramente cálida, neutra, ligeramente fría, fría, muy fría.
Evaluación afectiva	¿Cómo percibe la temperatura?
	Claramente aceptable, aceptable, inaceptable, claramente inaceptable.
Preferencia térmica	¿Quiere la temperatura del recinto?
	Más alta, sin cambios, más baja.
Ambiente térmico	
Aceptabilidad personal	¿Cómo percibe la calidad del aire?
	Claramente aceptable, aceptable, inaceptable, claramente inaceptable.
Tolerancia personal	¿Cómo percibe la intensidad del olor?
	Sin olor, olor débil, olor moderado, olor fuerte, olor muy fuerte, olor abrumador.
Estado emocional	
Grado de estrés	La actividad que está realizando...
	Le estresa, es normal, le relaja.
Estado de ánimo	Usted está ahora mismo...
	Feliz, optimista, entusiasmado, normal, apático, deprimido, triste.

**Tabla 17.1:** Cuestionario principal de respuestas subjetivas.

## 17. LA LÓGICA DIFUSA PARA LA DETECCIÓN DE CONFIGURACIONES CLIMÁTICAS ASOCIADAS AL CONFORT

---

Los usuarios cumplimentaron una segunda encuesta, realizada junto con la primera, una única vez en el día. La segunda encuesta contenía un cuestionario sobre datos personales, sexo, edad, estatura, peso y vestimenta.

Los grados o escalas elegidas para las respuestas se formularon en español sobre una muestra de población nativa, no existiendo efectos en la interpretación de las palabras utilizadas en las escalas de preferencia por el lenguaje o el contexto [Humphreys, 2008]. Los grados y escalas del estado personal y del ambiente térmico pertenecen a la ISO 10551 [AENOR, 2002].

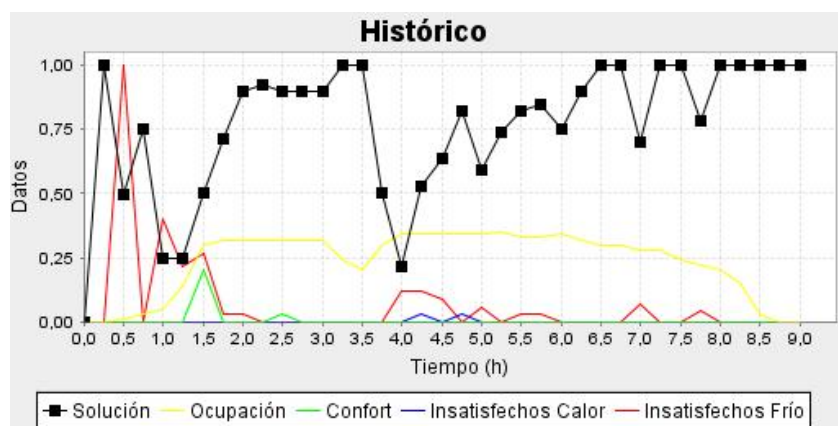
### 17.3 Resultado

La aplicación diseñada ha generado hasta el momento dos tipos de resultados: simulaciones y experimentación con usuarios. Ambos resultados se muestran en los siguientes apartados.

#### 17.3.1 Simulación

Se ha realizado la simulación de un sistema central de climatización para el área de aproximadamente  $800\text{ m}^2$  de un edificio representativo en el que la máxima ocupación posible es de cien personas, y que durante el año tiene una ocupación que varía entre el veinte y el sesenta por ciento de ocupación media. Las simulaciones presentadas son para un espacio temporal desde las siete de la mañana (tiempo  $h=0$ ) hasta las cuatro de la tarde (tiempo  $h=9$ ). En la figura 17.8 se muestran situaciones sin confort para un día perteneciente a un periodo invernal. La solución se ha representado en un intervalo de cero a uno para mayor claridad.

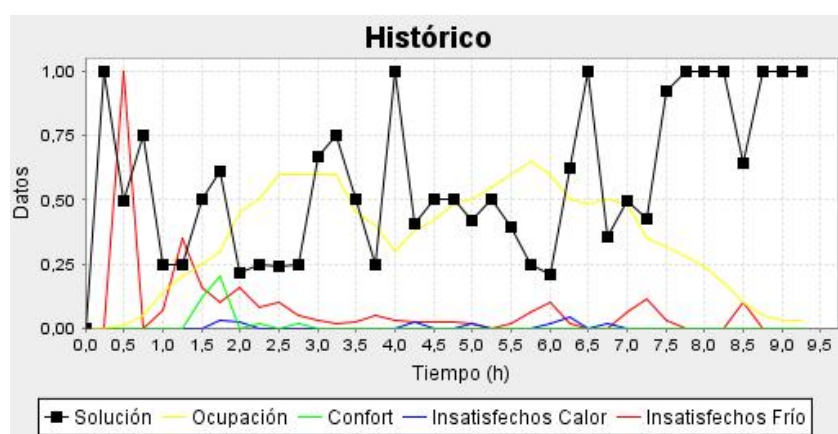
La metodología expuesta ha sido aplicada sobre diferentes simulaciones de datos. En la figura 17.8 se muestra la variación de la solución durante nueve horas de estudio. Éstas han sido divididas en espacios temporales de 15 minutos cada una. Estos 36 espacios temporales muestran el estado del edificio en tanto por uno y la configuración que debe ser aplicada (Solución). El valor cero representa la configuración de máximo confort y el valor uno representa el máximo ahorro. En este caso se muestra el edificio con una ocupación baja (entorno al 30 %). En la figura se observa que el sistema tiende al confort en el cuarto y quinto espacio temporal,



**Figura 17.8:** Cambios de configuración en un periodo invernal con ocupación baja.

debido a que éstos son los primeros instantes del día, y en ellos se observa un crecimiento de la ocupación junto con un alto número de usuarios insatisfechos por frío. En el décimo sexto espacio temporal se observa otra situación similar, esta vez debida a una situación de frío de un grupo importante de usuarios.

En la figura 17.9 se puede observar que ante una constante situación de usuarios insatisfechos (durante una hora a partir de la segunda hora) el sistema mantendría la decisión de tomar valores que mejoren el confort.

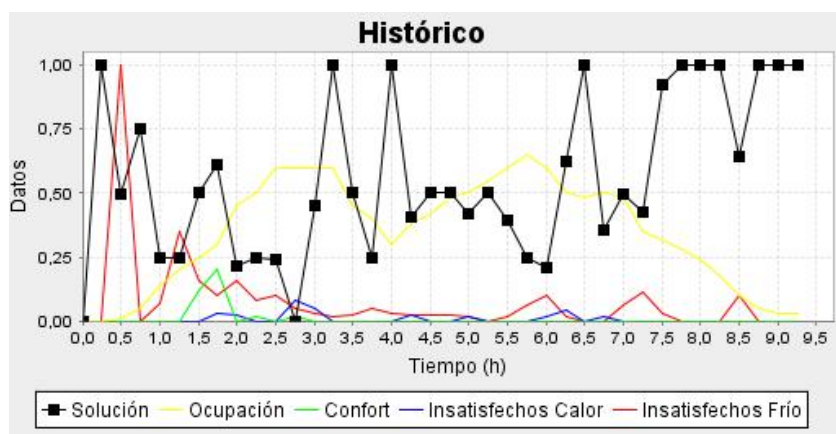


**Figura 17.9:** Cambios de configuración en un periodo invernal con ocupación media-alta.

En las figuras 17.10 y 17.11 se muestra el comportamiento ante una ocupación media-alta. En ella se muestra mayor número de personas insatisfechas con

## 17. LA LÓGICA DIFUSA PARA LA DETECCIÓN DE CONFIGURACIONES CLIMÁTICAS ASOCIADAS AL CONFORT

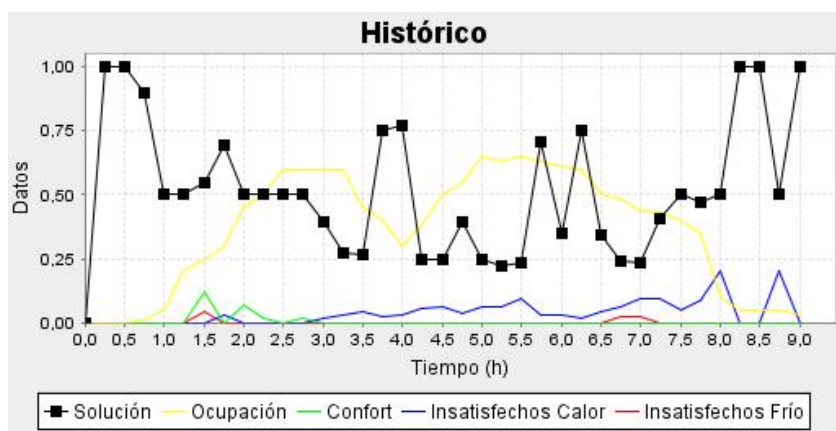
la temperatura. En el séptimo espacio temporal se muestra un valor relevante de valoraciones de confort. El valor de estas opiniones es tenido en cuenta por no ser un conjunto pequeño de valoraciones, es por ello que se busca el ahorro pues crecen los conformes y decrecen los usuarios insatisfechos. En cambio, en el décimo primer espacio temporal se muestra una situación para la cual en el edificio en conjunto hay disparidad de sensaciones de confort, unas por frío y otras por calor, por lo que se buscan los valores que permitan el mayor confort del edificio.



**Figura 17.10:** Cambios de configuración en un periodo invernal con ocupación media-alta.

En la figura 17.11 se muestra una situación en el supuesto de encontrarse en el periodo estival.

La interpretación del resultado puede generar confusión por ser un valor de información aplicable en una toma de decisión. En este sentido, en las figuras 17.8, 17.9, 17.10 y 17.11, un valor uno en la configuración representa el ahorro. Esto significa que el sistema debe de elegir valores dentro del rango de confort que no le supongan esfuerzo energético al sistema central. Con certeza el cambio se entiende debe hacerse de manera gradual. Por otro lado, un valor cero representa el confort, esto supone que se deben buscar aquellos valores del rango más centrados, puesto que hay situaciones de confort dispares. Los valores intermedios indican el grado de cercanía a los valores de ahorro y confort. Por ejemplo en el periodo vigésimo de la figura 17.11, la solución es aproximadamente 0,25; lo que supone que el sistema debe dar valores cercanos al máximo confort. Esto es lógico pues los



**Figura 17.11:** Cambios de configuración en un periodo estival con ocupación media-alta.

usuarios tienen calor (5 % expresan su insatisfacción) y por tanto el sistema debe generar valores de confort que se alejen del confort que limita con el calor.

### 17.3.2 Experimentación

Junto al sistema presentado se realizó una herramienta web para la cumplimentación de encuestas, los datos del usuario se almacenaban en una base de datos, que analizaba el sistema para la toma de decisiones. El sistema registra el confort personal, la valoración de éste, dónde y en qué medida. Además, se pueden registrar los cambios deseados sobre el estado de las salas.

Anteriormente se estudiaron simulaciones de este sistema de lógica difusa que reflejaban su funcionamiento, aunque los parámetros se deben calibrar para su uso en un sistema real, como ocurre de manera general en los sistemas de lógica difusa. La metodología aplicada ofrece información que permite la toma de decisiones necesaria para lograr el mayor número de usuarios conformes y el ahorro gradual de la energía en los periodos en los que los usuarios estén adaptados, mejorando la eficiencia del edificio.

Los estudios realizados en la última década se centran en diversos aspectos del amplio campo del confort, en ellos se pueden distinguir dos tipos de estudio: Las pruebas de laboratorio en cámaras climáticas y las pruebas de campo en la gestión

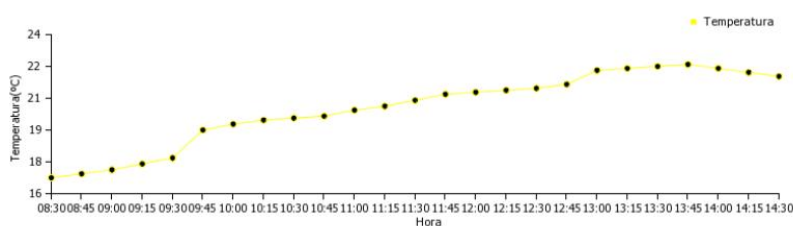
## 17. LA LÓGICA DIFUSA PARA LA DETECCIÓN DE CONFIGURACIONES CLIMÁTICAS ASOCIADAS AL CONFORT

---

de edificios. Este trabajo presenta un caso real mediante el cual se ha validado el modelo explicado anteriormente.

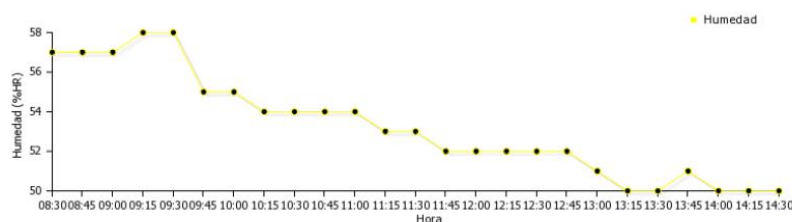
La experimentación se realizó en diciembre de 2010 en dos espacios de trabajo de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. El área de estudio se encuentra en una segunda planta, con ventanas en las que no hay luz directa del sol por su orientación, por lo que no se encuentra muy afectado por variaciones en las condiciones de ambiente exterior. El espacio analizado corresponde a  $78,37 m^2$ , el acondicionamiento térmico se realiza con dos sistemas fan-coil de un sistema de climatización centralizado. Para este experimento, se realiza el estudio con un único sistema de climatización central, aportándose la misma decisión de temperatura sobre los aparatos de las diferentes áreas.

El espacio tiene instalados 16 puestos de trabajo en conjunto. El estudio se realiza entre las 8:30 horas a 14:30 horas. Los usuarios estudiados se encuentran en un rango de edad entre 25 y 29 años, con buen estado de salud y forma física, la ropa mayoritariamente es pantalones de vestir, camisa de manga larga, jersey de manga larga, calcetines de invierno y zapatos. Las condiciones exteriores del día se mantuvieron entre los  $9 - 13^{\circ}C$  y una humedad superior al 80 %. Durante el estudio se realizaron medidas de temperatura, humedad relativa del interior de cada espacio, véase figura 17.12 y 17.13.



**Figura 17.12:** Temperatura de la sala A.

Junto con las mediciones que se realizaron en las salas, los usuarios cumplieron los cuestionarios mediante una herramienta web. En la figura 17.14 se presenta la respuesta perceptiva de los usuarios, en ésta se muestra el porcentaje de respuesta de todas las encuestas relacionadas con la primera pregunta. Durante el estudio ningún usuario valoró la temperatura como calurosa. El 28 % de las res-



**Figura 17.13:** Humedad de la sala A.

puestas representan sensación de confort o neutralidad, el 44 % insatisfacción por frío y el 28 % insatisfacción por calor.



**Figura 17.14:** Respuesta perceptiva de los usuarios.

A lo largo del estudio el 80 % de las encuestas opinaron positivamente respecto de la percepción de temperatura (figura 17.15), igualmente un 80 % de las encuestas indicaban que la temperatura fue neutra, ligeramente fría o cálida (figura 17.14), los resultados fueron muy positivos, ya que en los estudios de confort objetivo un 10 % de insatisfechos manifiesta una situación satisfactoria para la mayoría de las personas. Las ecuaciones de los modelos objetivos no contemplan situaciones ideales donde no exista ningún trabajador insatisfecho con las condiciones térmicas, estimando que en las mejores condiciones de confort térmico al menos un 5 % puede no estar conforme.

Durante la experimentación sólo un 4 % de las encuestas reclamaba que la temperatura fuera más baja, mientras que el 56 % de las encuestas demandaba una subida de la temperatura (figura 17.16).

Como se observa en la figura 17.17, la calidad del aire durante la experimentación fue altamente aceptable, existiendo una leve sensación de olor en el ambiente

17. LA LÓGICA DIFUSA PARA LA DETECCIÓN DE CONFIGURACIONES CLIMÁTICAS ASOCIADAS AL CONFORT

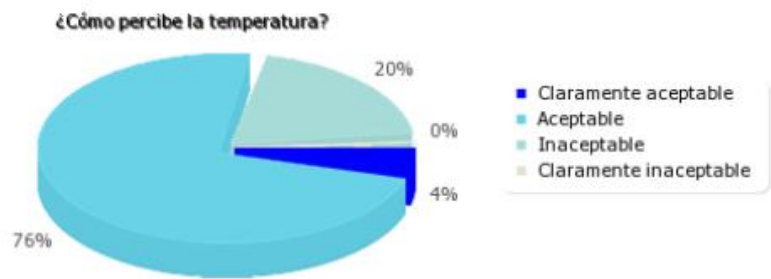


Figura 17.15: Evaluación afectiva de los usuarios.

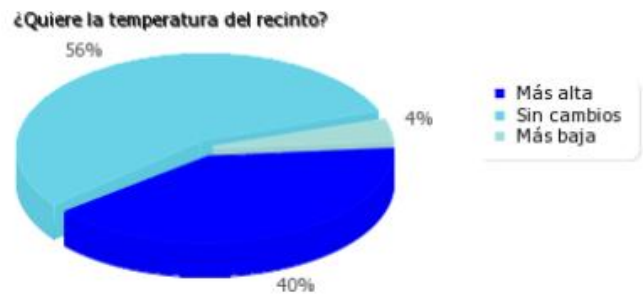


Figura 17.16: Preferencia térmica de los usuarios.

(figura 17.18).

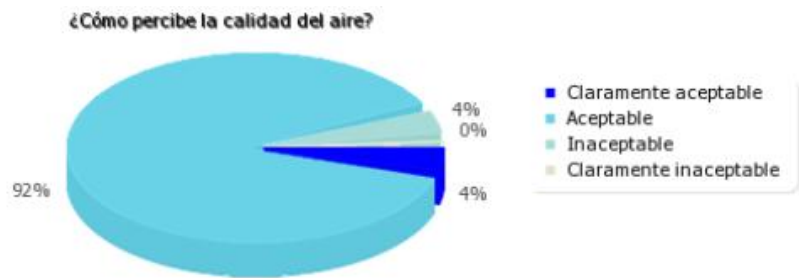


Figura 17.17: Aceptabilidad personal del ambiente térmico.

Durante la experimentación el 80 % de las encuestas reflejó normalidad, frente al 20 % de éstas que reflejaron estrés (figura 17.19). Sin embargo, el estado de ánimo de los usuarios siempre fue positivo o normal (figura 17.20).

En la figura 17.21 se muestran las respuestas a la primera pregunta en tanto por uno, al igual que la ocupación. La ponderación de la solución se representa, para la



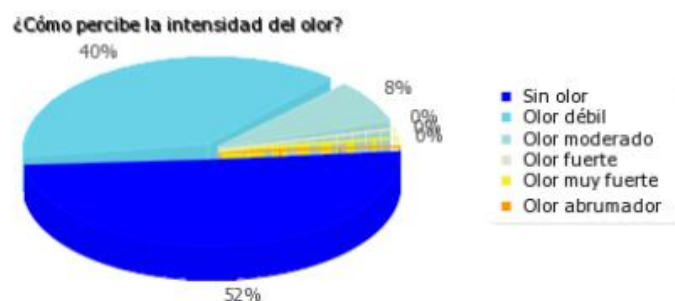


Figura 17.18: Tolerancia personal.

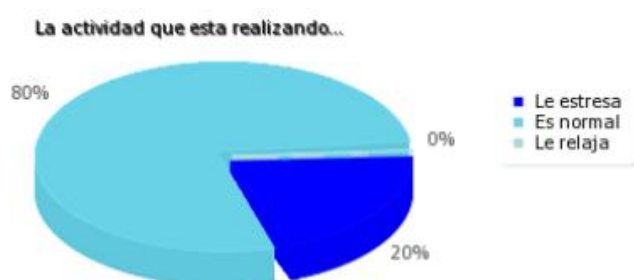


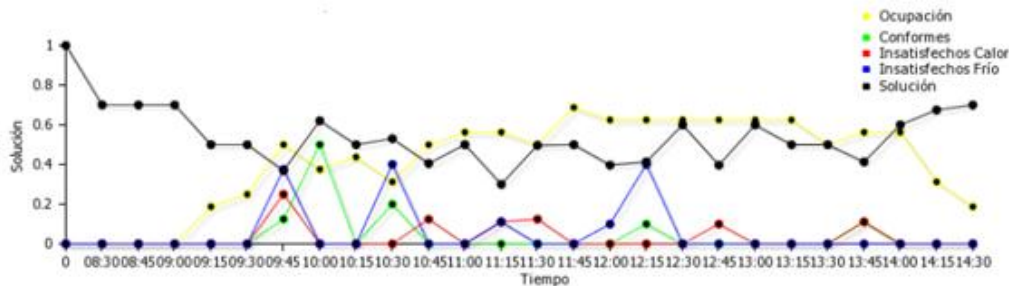
Figura 17.19: Grado de estrés de los usuarios.



Figura 17.20: Estado de ánimo de los usuarios.

## 17. LA LÓGICA DIFUSA PARA LA DETECCIÓN DE CONFIGURACIONES CLIMÁTICAS ASOCIADAS AL CONFORT

cual un uno representa maximizar el ahorro, y un cero maximizar el confort.



**Figura 17.21:** Resultado temporal del sistema de lógica difusa.

Como se puede observar en la gráfica, no existieron valores altos de maximización del confort, como se puede ver en las simulaciones del apartado anterior. Para que se produzcan dichos resultados debe existir una mayor disparidad en las respuestas, esto podría ocurrir a las 9:45, pero al existir gran cantidad de conformes con la temperatura, la petición de maximización del confort es menor, reduciéndose el grado de necesidad de éste. Sin embargo, a las 11:15, 12:15 y 12:45 se observaron momentos de prevalencia del confort, frente a los primeros y últimos instantes del día, donde la ocupación generó una clara tendencia al ahorro energético.

El sistema reflejó la necesidad de buscar el ahorro y el confort, aunque la tendencia fue mayor al confort por la alta ocupación del espacio, que fue modificada en base a la respuesta al cuestionario de los usuarios.

### 17.4 Conclusiones

En el futuro, los sistemas de HVAC se basarán en preferencias comunicadas por el usuario mediante dispositivos tecnológicos. En las salas de los usuarios los rangos de valores de confort serían conocidos en base a esas preferencias. Los rangos de valores pueden ser amplios o no, pero no siempre se pueden elegir los valores de máximo ahorro, al igual que en otros estudios se usa el porcentaje de personas disconformes, en éste se presenta la metodología que permite tomar la decisión sobre el valor del rango a elegir en función de la situación del sistema central, lo que permitiría a éste ahorrar y relajar el valor de confort en situaciones en que éste es generalizado por la adaptación de los usuarios. También en situaciones del día

en que el malestar es general permitiría detectar la situación y maximizar el confort de los usuarios en cuanto a la capacidad permitida por el sistema central.

Los cambios que ocurren dentro de un periodo de tiempo no son detectados. El periodo de tiempo elegido puede ser modificado, al igual que otros parámetros que deberían de ser calibrados para el uso en un sistema real, como ocurre de manera general en los sistemas de lógica difusa.

La metodología aplicada ofrece información que permite la toma de decisiones necesaria para lograr el mayor número de usuarios conformes y el ahorro gradual de la energía en los periodos en los que los usuarios estén adaptados. Esta metodología permite un mayor ahorro frente a la adaptación a situaciones climáticas fijas que se utilizan en los sistemas actuales.

La aplicación de la metodología podría ser efectiva a falta de realizar investigaciones en la selección del valor de temperatura de la sala en base a las respuestas del cuestionario junto con la ayuda para la toma de decisiones que proporciona este sistema.

La experimentación actual es poco significativa debido al tamaño de la muestra estudiada. El estudio se debe aplicar a un mayor número de usuarios en un mayor número de salas. De igual manera se debe realizar una experimentación en la que se modifique el periodo de tiempo entre respuestas. Igualmente se debe estudiar este sistema para salas en las que se efectúen modificaciones de temperatura desiguales.

La aplicación de situaciones climáticas fijas aplicadas en la actualidad es poco eficiente. Las futuras investigaciones deben tener en cuenta las necesidades de los usuarios de forma dinámica. Por tanto, se deben investigar sistemas de información que maximicen la eficiencia energética teniendo en cuenta el confort de los usuarios en base a las respuestas realizadas en el momento, y a modelos de espacio de confort de los ocupantes en base a las encuestas realizadas en el pasado.



*La diferencia entre una democracia  
y una dictadura consiste en que en  
la democracia puedes votar antes de  
obedecer las órdenes*

Charles Bukowski

## CAPITULO 18

# **Metodología para el análisis y toma de decisiones mediante encuestas en los edificios**

Las encuestas sobre el confort de los usuarios, permiten observar y predecir el nivel de confort en el sistema de climatización, su realización a través de Internet ayuda en el reconocimiento de los patrones de comportamiento que se producen en las oficinas. En este capítulo se presenta una metodología especialmente diseñada con el fin de facilitar la extracción y representación del conocimiento, de esta manera es posible tomar decisiones sobre la comodidad de los edificios. La metodología proporciona información importante y útil para seleccionar el punto de ajuste confort de las habitaciones de un sistema de climatización central sin necesidad de utilizar valores fijos, basados en programas horarios o cualquier otra metodología. En esta metodología, los usuarios son evaluados mediante el uso de un conjunto de preguntas clave, presentadas en el capítulo 15. Se pretende una mejora en el confort de los usuarios de los edificios, independientemente de sus particularidades.

## **18. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS Y TOMA DE DECISIONES MEDIANTE ENCUESTAS EN LOS EDIFICIOS**

---

Las herramientas diseñadas para el rendimiento térmico de los edificios tienen un enorme potencial para frenar el despilfarro de energía y reducir los problemas ambientales. En consecuencia, se propone una nueva filosofía que asegure el desarrollo de herramientas de diseño eficaces en el futuro, teniendo también en cuenta los intereses de los ocupantes. En base a esta filosofía, se ha propuesto una nueva herramienta de diseño.

Muchos modelos de confort humanos se han desarrollado en los últimos años con el fin de lograr una mejor aproximación de la realidad, tal como un humano se siente en un entorno dado. En general, los patrones de los modelos de confort térmico se basan en estudios llevados a cabo en poblaciones específicas en un espacio concreto, sin embargo, muchos de estos patrones se aplican en todo tipo de construcción de la misma manera, sin distinguir sus particularidades. El índice PMV es un buen ejemplo, y son muchos los controles de temperatura basados en éste. Sin embargo, muchos autores son críticos [Van Hoof, 2008], aunque no es totalmente aplicable a todas las partes del mundo, los modelos PMV aproximan a la realidad, pero se puede mejorar con un diseño para cada edificio.

Un sistema de climatización en el cual los parámetros de funcionamiento estén mal seleccionados, puede causar una disminución de la productividad, porque el confort térmico se sabe que tiene una influencia significativa en la productividad y la satisfacción de los ocupantes en un entorno de edificio [Akimoto et al., 2010]. Estos sistemas, obviamente, necesita tener suficiente capacidad de toma de decisiones para poder tomar una decisión sobre el nivel de confort y ahorrar tanta energía como sea posible. Sin embargo, hay ciertas situaciones en las que la maximización de la comodidad debe prevalecer sobre el ahorro.

Ajustar el confort para maximizar el ahorro puede suponer una pérdida de la calidad en el confort; en cambio, maximizar el confort durante un periodo de tiempo para permitir la adaptación de los usuarios, esperar y reducirlo a valores de maximización del ahorro puede permitir mejorar la calidad y aceptación de este ahorro. Esto mejorará la eficiencia energética del edificio, junto con un alto nivel de aceptación por parte de los usuarios en comparación con la energía que se desperdicia actualmente en los edificios.

Debido a las diferentes percepciones de lo que es “cómodo”, que se producen debido a que algunas personas son más tolerantes a condiciones climáticas más

amplias que otras. Obviamente, si la norma es aceptada o no depende claramente del clima del lugar y las condiciones del edificio. Por lo tanto, sin cuestionar los sistemas estándar, se deben desarrollar sistemas de confort cuya ventilación y aire acondicionado se basen en los modelos de confort personalizados. Como se indicó en el capítulo 17, los sistemas se tienen que adaptar a los usuarios, las variaciones de ocupación, la temperatura corporal y otros efectos comunes.

Hay diversos ejemplos de estudios donde las encuestas o los muestreos tienen como objetivo obtener el nivel de confort personal en el inicio o final del día. Estos estudios, que incluían diferentes tipos de edificios, utilizan la información sobre las características físicas de los edificios y los espacios de trabajo. Sin embargo, no se tuvieron en cuenta en estos estudios los valores de confort asociados con la habitación [Huizenga et al., 2002]. Pero como dice Brager “Una premisa importante del modelo de adaptación es que la persona ya no es un receptor pasivo del ambiente térmico determinado, sino que es un agente activo interactuando con el sistema persona-ambiente a través de múltiples ciclos de retroalimentación” [Brager y de Dear, 1998].

### 18.1 Metodología

La metodología se presenta en la figura 18.1, para la toma de decisiones de los parámetros de un sistema de HVAC. En primer lugar, se llevan a cabo muestreos del confort de los ocupantes, y, al mismo tiempo se obtienen los parámetros espaciales de estudio. Estos datos son almacenados y procesados. Con esta información procesada, el sistema obtiene los criterios de decisión que deben aplicarse a la búsqueda de una solución que va a mejorar el confort y ahorrar energía en el edificio. Una vez que esta información se hace disponible (Fase 1), se debe hacer un estudio del coste de la modificación de los parámetros de temperatura y humedad respecto a la variación de la comodidad para los usuarios, sobre la base de la información almacenada. El sistema debe seleccionar el valor que satisface (Fase 2), de la mejor manera posible, los criterios seleccionados en la fase anterior. Por último, hay que aplicar la configuración del sistema.

## 18. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS Y TOMA DE DECISIONES MEDIANTE ENCUESTAS EN LOS EDIFICIOS

---

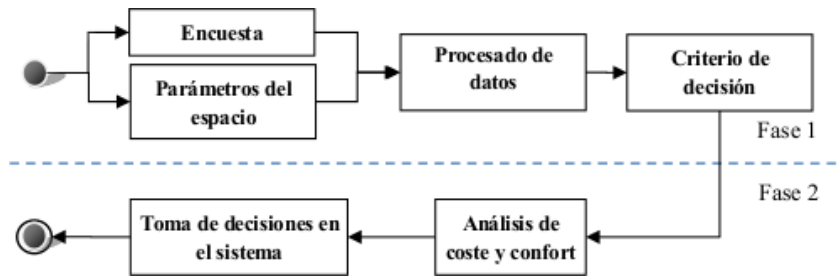


Figura 18.1: Metodología.

### 18.2 La arquitectura del sistema

La estructura del sistema como se muestra en la figura 18.2, se basa en la respuesta de los usuarios a las encuestas (Capítulo 15), en lugar de ser controlada por un mando a distancia para seleccionar el punto de ajuste de la temperatura. Esto permite controlar la humedad, que por lo general no podría ser elegida por los usuarios.

La información de la encuesta junto con los datos de temperatura, humedad y ocupación dada por los sensores (Capítulo 16) se almacenan en una base de datos. El sistema de lógica difusa (Capítulo 17) obtiene la información del criterio con el cual decidir para la selección de la temperatura y la humedad adecuada en esta primera fase.

El razonamiento basado en la lógica difusa (FL) es muy simple y flexible, además, es adecuado con datos imprecisos como sucede con el confort. El lenguaje cotidiano, pese a utilizar el mismo vocabulario, para diferentes personas pueden tener diferentes valores, estos valores se conocen gracias a un cuestionario de respuestas imprecisas. La lógica difusa permite garantizar la reacción del sistema en base a la experiencia de las personas.

A través de sensores y gracias a las herramientas tecnológicas actuales con acceso a Internet, los usuarios pueden ser evaluados y el confort puede ser personalizado, en todas las situaciones y en cualquier lugar. Además, se pueden registrar los cambios deseados sobre los estados de las habitaciones.

En el capítulo 17, se presenta un sistema basado en la lógica difusa, el sistema tiene como objetivo proporcionar un sistema fiable de fácil aplicación, este objetivo se logra gracias a la simplicidad de las variables de entrada necesarias: porcentaje y variación de la ocupación, junto con la evaluación del confort medido



## 18.2 La arquitectura del sistema

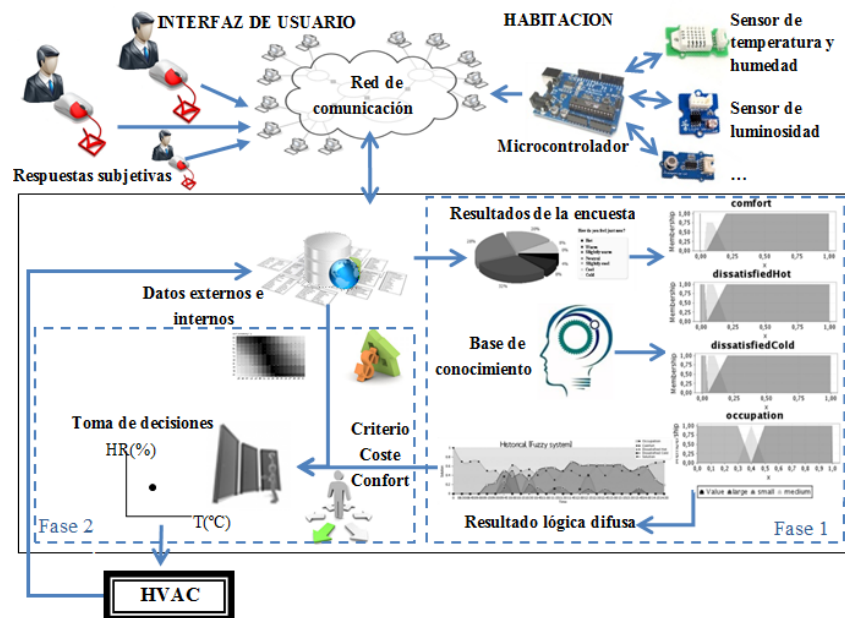


Figura 18.2: La arquitectura del sistema.

por su satisfacción o insatisfacción respecto al frío o calor. Durante el proceso, el sistema aplica la lógica difusa para convertir las variables a variables difusas (fuzificación). Una vez que se obtienen los componentes de cada variable, se calcula un conjunto de reglas lógicas teniendo en cuenta la variación del período anterior (proceso de inferencia). Un ejemplo de regla es: “La preferencia se debe dar al ahorro de energía si la ocupación del edificio es baja, su variación es negativa (los usuarios están dejando las habitaciones) y el número de usuarios insatisfechos por calor disminuye y su variación también negativa”. Las respuestas de las reglas difusas (confort, neutral y ahorro) se utilizan para demostrar que existe un cambio significativo en el nivel global del confort y representa la configuración a la que el sistema debe dar preferencia. Finalmente, para tomar una decisión acerca de que demanda debe prevalecer (la comodidad del usuario o el ahorro en un sistema central), es necesario transformar los resultados anteriores del proceso de inferencia en un único resultado interpretable matemáticamente en la forma de la probabilidad (defuzzificación).

Por otra parte, ya que no sólo el tamaño del flujo es considerado, sino también esta variación en un período anterior, a través de la preparación cuidadosa de las

## **18. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS Y TOMA DE DECISIONES MEDIANTE ENCUESTAS EN LOS EDIFICIOS**

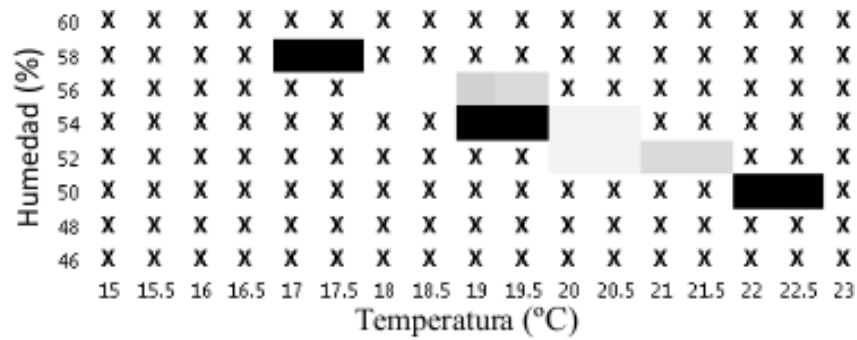
---

reglas, no sólo el patrón de confort se puede detectar, sino también el error en el siguiente periodo se puede predecir con una pequeña probabilidad. Todo esto, con una pequeña cantidad de información posible e independientemente de la temperatura o las particularidades de cada usuario. Las reglas lógicas de decisión, en caso de que se detectaran varios tipos, la respuesta será aquella con mayor valor de probabilidad. Este análisis se hace siempre después de un período de tiempo específico y una decisión posterior se ha de tomar en relación con el tipo de ajuste climático.

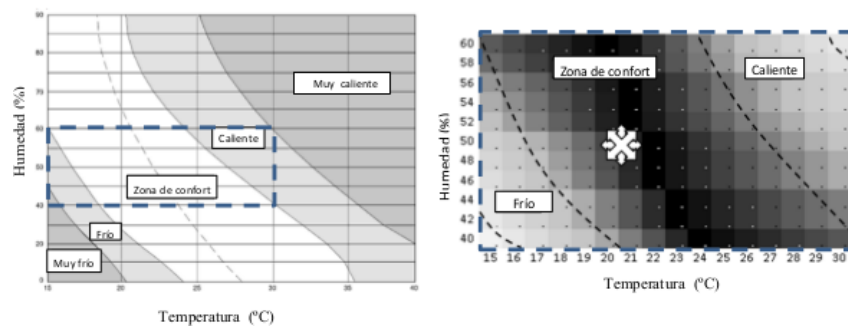
En una segunda fase del sistema, teniendo en cuenta los resultados del sistema de lógica difusa en la primera fase, y la información almacenada sobre el confort de cada persona a través de las encuestas, junto con los datos y la función de coste del cambio de las condiciones de confort, se puede seleccionar un conjunto de valores de confort para asociar a la sala, en base a criterios de confort y ahorro energético. Este segundo sistema toma la decisión sobre el sistema de climatización, la decisión debe ser preservada y aplicada en los siguientes períodos de tiempo.

Los valores individuales de los usuarios son agrupados en el sistema, generándose una tasa o estado de confort con respecto a las diferentes condiciones climáticas de las habitaciones (después de entrenar el sistema). En la figura 18.3, sobre la base de estos valores, se conoce la diferencia de comodidad con respecto al estado actual de la habitación. Por otra parte, si se conoce el diferencial de consumo para un cambio de temperatura en una habitación en base a nuestro sistema de climatización. El cambio más beneficioso se seleccionará con respecto al criterio dado por el sistema de lógica difusa. Las respuestas de la encuesta se almacenan individualmente para cada usuario, el sistema aprende los resultados individuales, y estos se pueden compactar en un modelo general o para cada habitación. Se almacena para cada intervalo de temperatura y humedad, el promedio de aceptación por el grupo de usuarios. Después del primer día, se observa que la temperatura y humedad varían, inicialmente existirían áreas de las que no se tendrían datos, en la figura 18.3 se representan los valores mediante cruces. Los intervalos de temperatura y humedad de mayor confort aparecen con cuadros de color negro, los de menor confort con color blanco, y en los valores intermedios con tonalidades de grises.

Pero con el tiempo, se encuentran modelos de confort similares que seguirán la curva de comodidad Fanger (Figura 18.4 izquierda), pero sin duda más real para la comodidad del usuario (Figura 18.4 derecha).



**Figura 18.3:** Primer día.



**Figura 18.4:** La figura de la izquierda muestra la curva de comodidad de Fanger [Mondelo y Universal, 1999]. La figura de la derecha muestra un posible grado de confort en un edificio.

## 18. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS Y TOMA DE DECISIONES MEDIANTE ENCUESTAS EN LOS EDIFICIOS

---

Como se muestra en la figura 18.4 derecha, suponiendo que se encuentra en un punto ( $22^{\circ}\text{C}$ , 50 % *HR*) sólo se tiene que calcular el diferencial de confort con respecto a los puntos más cercanos. Junto con la cantidad de energía que se debe aplicar en esa dirección, por lo general el consumo debe ser inferior debido a los sistemas de evaporación, estos sistemas pueden reducir significativamente el consumo de energía en un cambio en un grado de confort. Este tipo de sistemas ha demostrado un 15 % de ahorro en el consumo anual de energía del edificio, manteniendo la comodidad la mayoría de las horas del año [Khandelwal et al., 2011]. La arquitectura de este sistema aporta nuevas formas de decisión que tienen en cuenta otras variables como la humedad, y no solo la temperatura. La adopción de este tipo de sistemas, donde los usuarios son conscientes de la humedad, pero no son capaces de controlar sus cambios, ayudará a la aplicación eficiente de los sistemas evaporativos.

### 18.3 Conclusiones

La metodología propuesta para el sistema de control permitirá una mejor evaluación del clima interior mediante el uso de encuestas. La primera fase de la metodología ha sido probada y desarrollada. Se espera que el resultado de esta metodología mejore el control de los edificios sobre la base de encuestas de confort térmico. La aplicación de la lógica difusa como sistema de ayuda en la toma de decisiones, respecto a las variaciones a realizar en el edificio, mejorarán su eficiencia y los cambios bruscos de temperatura que suelen rodear a los sistemas de control basados en la selección de temperatura por parte de los usuarios.

Hay una necesidad de asegurar que el punto de vista del ahorro de consumo de energía está presente de forma explícita, sin perjuicio de la comodidad de los ocupantes del edificio. Hoy en día, estas dos perspectivas no están conectadas. Esta investigación proporciona la oportunidad de equilibrar confort y ahorro de energía. La eficiencia de los sistemas de HVAC y flexibilidad deben equilibrarse con las consideraciones de los usuarios. Se ha presentado una nueva metodología y la estrategia de control de HVAC y criterios de decisión que regula los niveles de confort térmico. El sistema se adapta dinámicamente a los cambios en el confort, almacena

las respuestas de los usuarios de forma dinámica para satisfacer su confort individual y permite conocer el efecto de los cambios en las decisiones del sistema.

Lógicamente, se está desarrollando una técnica para evitar los problemas y las luchas internas para la selección de la temperatura dentro de un espacio de trabajo, donde el aire acondicionado no es del gusto de todos. Sin embargo, este problema de decisión puede ser resuelto por esta metodología, que permite desarrollar un sistema democrático, por tener en cuenta al usuario, mediante la obtención de un criterio de decisión basado en un muestreo, con el fin de crear confort interior y el ahorro de energía que la UE exige para el año 2020.



*La vida es el arte de sacar conclusiones suficientes a partir de datos insuficientes*

Samuel Butler

# CAPITULO 19

## Conclusiones de interés para la tesis

El presente trabajo de investigación surge de la necesidad que actualmente tiene la sociedad de buscar un futuro confortable y sostenible de sus edificios. Para ello, a lo largo de este bloque, se han estudiado y revisado los sistemas expertos aplicados al confort y climatización de los edificios durante su vida útil.

En el capítulo 11 se presentó el concepto de confort y los elementos que afectaban en éste, además se introdujeron los dos modelos aplicados en el estudio del confort: los modelos estáticos y los modelos adaptativos. Estos últimos son los que más se están investigando.

En el Bloque I, se presentó el concepto de sistema experto, las diferencias con los sistemas convencionales y las metodologías asociadas a este término. En el capítulo 12 se presentan las técnicas, herramientas e índices que se suelen aplicar en los edificios. Se observó que el índice PMV y PPD es el más utilizado, y es una buena herramienta para comparar un estudio, sin embargo muchos investigadores son también críticos con estos índices.

En el capítulo 13, se presentó una interesante comparativa de índices de área de la superficie del cuerpo, y se estudiaron sus efectos sobre el índice PMV, además de concluir cual debían de ser los nuevos índices a aplicar, sin menospreciar el

## **19. CONCLUSIONES DE INTERÉS PARA LA TESIS**

---

actual, se concluyó cuál debía ser el tipo de ocupante más favorable a un estudio de confort.

En el capítulo 14, se presentaron y compararon las técnicas y heurísticas aplicadas en la literatura. En el capítulo 15, se estudiaron las encuestas asociadas al estudio del confort, y se presentó una propuesta estudiada, y su ampliación. Además, se observó que los sistemas desarrollados no se basan en encuestas de confort, sino que o son estáticos o dinámicos respecto a las variables ambientales.

En el capítulo 16, se han presentado los sensores que pueden ser empleados para la investigación del confort de un edificio, y tecnología existente. Además se presenta un estudio del termómetro de globo aplicando hardware y software libre.

En el capítulo 17, se presenta una aplicación de la lógica difusa para la detección de configuraciones climáticas asociadas al confort, en base a estudios en los que se aplican encuestas, y por último, se presenta una metodología que engloba todo lo anterior en el capítulo 18. Es necesario almacenar el conocimiento existente respecto a los usuarios, sobretodo en edificios de oficina, donde diversas opiniones enfrentadas conviven frente a sistemas de HVAC, la decisión de la temperatura se debe tomar teniendo en cuenta no solo factores energéticos sino también basados en el confort.



## **Bloque IV**

### **Conclusiones y extensiones**



*Now this is not the end. It is not even the beginning of the end. But it is, perhaps, the end of the beginning.*

Winston Churchill

## CAPITULO 20

# Conclusiones y extensiones

Desde los primeros capítulos de este trabajo, se ha recalcado la importancia de mejorar la eficiencia energética de los edificios manteniendo el confort de éstos. Cuando los ocupantes de un edificio están en estado confortable sin aplicar sistemas de HVAC, iluminación, etc. los edificios ahorran energía, y cuando la energía aplicada es renovable, empezamos a divisar la perspectiva de los edificios de energía cero.

En el presente trabajo se ha demostrado que en varios ámbitos que conciernen a la vida de un edificio se pueden aplicar las técnicas existentes para mejorar el confort y/o ahorrar energía. Nuevas metodologías pueden mejorar el cálculo de las decisiones que tienen efecto sobre el confort y el ahorro energético o económico.

Igualmente se han descrito los conceptos básicos y los procesos que realizan estas técnicas para encontrar las soluciones más eficaces o ayudar a la toma de aquellas decisiones más correctas en el diseño de un edificio o durante la aplicación de sistemas de climatización.

El objetivo de todas estas técnicas da respuesta a la necesidad de resolver problemas complejos cuya naturaleza requiere de una capacidad de cálculo superior que ayude a los diferentes usuarios, entendiendo como tales a todas las personas que conviven con la vida de este, ya sean arquitectos, técnicos, jefes de obra, administradores, proveedores de materiales o usuarios finales del edificio, etc. cada

## 20. CONCLUSIONES Y EXTENSIONES

---

uno de los cuales requiere de un diseño y complejidad del sistema asociado a sus capacidades y conocimientos.

En el inicio de este documento se presentó el concepto de sistema experto, las diferencias con los sistemas convencionales y las metodologías asociadas a este término, mostrándose los ámbitos de aplicación de cada metodología que durante el transcurso de esta obra han sido presentados junto a su aplicación en el diseño, en el desarrollo, en la toma de decisiones y en la actividad diaria de los edificios energéticamente eficientes. Cabe destacar que este estado del arte de los sistemas expertos aplicados a los edificios energéticamente eficientes muestra la importancia y la necesidad de investigar en la eficiencia energética de los edificios desde el punto de vista de los sistemas de información debido a los actuales cambios de las leyes y normas de los países. Esta necesidad también puede observarse en la mayoría de las referencias de investigación recientes, las cuales están avaladas por proyectos con financiación.

Así, el documento ha partido de un bloque inicial en el que se han presentado las técnicas existentes, y a continuación se han desarrollado dos bloques.

El primer bloque ha prestado interés al diseño de los edificios, para lo cual se ha desarrollado una metodología capaz de reducir energía o mejorar la calificación de un edificio. Mediante técnicas heurísticas se ha reducido el coste computacional de la resolución del problema. Los resultados presentados han sido muy positivos y se han validado mediante la aplicación del software oficial. Destacan los ahorros entorno al 15 % en los edificios analizados, pero también los resultados una vez aplicados los resultados de los sistemas.

El segundo bloque, ha presentado una metodología para el estudio y mejora del confort de los edificios que utilizan sistemas de HVAC. A lo largo del trabajo se ha demostrado la necesidad de buscar nuevas soluciones a las aplicadas por los sistemas actuales. El sistema experto presentado busca abrir un ambicioso enfoque investigador en la exploración de un doble objetivo de confort y ahorro energético. Por supuesto quedan abiertas muchas líneas de investigación que potencien modelos personalizados y confortables centrados en la encuesta y en la organización, tratamiento y análisis de los datos para conseguir obtener valores que permitan a los HVAC tener en cuenta el confort mediante la personalización de los datos de todos los usuarios.

A continuación, se detallan los principales logros del trabajo realizado, así como aquellas facetas del estudio que requerirían una mayor profundización. Debe mantenerse en mente la idea con la que se inició el trabajo, la de crear y llevar a cabo el desarrollo de nuevas metodologías aplicadas al sector de la construcción. Puede tomarse por tanto lo que aquí se ha llevado a cabo como un punto de salida para la implantación definitiva de algunas de estas soluciones. Por supuesto, el trayecto investigador aplicado al segundo bloque de la tesis, esta más avanzado, debido a que la metodología completa ha sido validada para el diseño de los edificios. Sin embargo, para el tercer bloque, sería necesario acometer mejoras y estudios de mayor profundidad.

## 20.1 Extensiones y líneas futuras

La formulación de las metodologías presentadas en este trabajo, conforman el punto de partida para lograr sistemas que logren alcanzar un grado de madurez para su implementación a nivel comercial. A continuación se presentan algunas posibles mejoras, extensiones o líneas futuras a investigar.

### Edificación sostenible

#### Área de estudio

La metodología desarrollada está pensada para edificios de vivienda y pequeños edificios terciarios, sin embargo, podría desarrollarse una metodología para grandes edificios terciarios, cuya validación se basara en el programa LIDER-GT (Gran terciario).

#### Metodología

Los trabajos realizados para obtener la calificación energética de los edificios, se han diseñado en dos fases, la primera afectaba a la envolvente y sus elementos constructivos, y la segunda a los sistemas. Sin embargo, podría desarrollarse una mejora del algoritmo tabú que introdujera los sistemas, aunque en principio se cree que el efecto sobre el algoritmo podría ser más negativo que positivo respecto a la metodología actual, debería ser investigado. Téngase en cuenta que la necesidad de

## **20. CONCLUSIONES Y EXTENSIONES**

---

un sistema u otro depende de la demanda del edificio y esta es calculada en base a los elementos constructivos.

### **Datos**

Los datos de los elementos constructivos y de los sistemas actuales son difíciles de conseguir, es necesario promover una normativa que obligue a los fabricantes a generar una gran base de datos de materiales y precios, con la cual los diseñadores y el software de diseño puedan aplicar esta tecnología de forma fácil para el usuario.

### **Modelo simplificado**

El cálculo detallado por LIDER, recoge también otros elementos, como es el caso de las sombras, sin embargo el modelo simplificado no puede tener en cuenta esta información, se deberían realizar estudios respecto a los efectos de elementos de sobra en el modelo simplificado y en la aplicación de ésta metodología. Para estudiar la viabilidad de crear un nuevo modelo simplificado.

### **Criterio de búsqueda**

Por otra parte, sería interesante crear nuevos modelos de búsqueda multi-objetivo que no sólo incluyan el CCV y la demanda o el IEE, sino que también incluyan restricciones respecto a la inversión inicial del edificio, en base a los resultados obtenidos en el estudio y el posible interés por parte de las constructoras.

### **Respuesta**

La respuesta actual del sistema que aplica la metodología desarrollada es de carácter numérico, sin embargo, como se observó en el estado del arte, se pueden desarrollar sistemas expertos con respuestas textuales y más cercanas al usuario, por tanto, sería interesante desarrollar informes de respuesta similares a las de un experto desde el punto de vista textual.

### **Climatización y confort**

#### **Técnicas y metodología**

Respecto a los sistemas de climatización y confort, se debe desarrollar el uso de sistemas multi-agentes aplicados a la metodología desarrollada, en el caso de los edificios de oficina, los usuarios son como elementos de una gran colmena, las decisiones sobre ésta se deben realizar en base al conocimiento colectivo, en este caso, los ocupantes y los sensores hacen el efecto de agentes que aportan información a un agente central que toma decisiones sobre agentes actuadores sobre cada zona del edificio.

Además, esta metodología debe ser ampliada y englobar acciones de confort debido a la iluminación, en base a las encuestas desarrolladas y de la misma manera respecto a la ventilación necesaria para alcanzar una buena calidad del aire.

Por otra parte, sería interesante desarrollar un sistema que aplicara la lógica difusa en base a las encuestas del estado actual, y que además tuviera en cuenta el estado del sistema a esa hora en los días anteriores, basándonos en la idea de los modelos adaptativos presentados.

#### **Sistemas evaporativos**

Por otra parte, los sistemas de climatización requieren de un control de las variables ambientales tales como presión, temperatura, humedad, etc. La mayoría de las personas suelen tener una alta tolerancia a las variaciones de humedad, pero el control de humedad es raramente empleado en los edificios. Existe una diferencia entre el calor sensible que somos capaces de medir con los termómetros, el calor que sentimos, y el calor latente o el calor que es necesario para cambiar el estado de un cuerpo sin alterar su temperatura y que no es percibido por el cuerpo humano. La aplicación de sistemas evaporativos se fundamenta en que aprovechando el calor del aire para evaporar agua, la cantidad de humedad relativa en el aire aumenta y el nivel de confort mejora. Esto supone tanto una revolución ecológica, como económica, ya que se deja de utilizar la aportación eléctrica que supone modificar la temperatura en los sistemas de aire acondicionado tradicionales mediante el uso de una aportación de agua al ambiente.

## **20. CONCLUSIONES Y EXTENSIONES**

---

En esta rama de la investigación, en la actualidad quedan por investigar las posibles estrategias que permitan el control eficaz de la temperatura asociada al mismo tiempo a unos niveles aceptables de humedad en el interior, que generen un estado de confort aceptable.

### **Modelado del confort**

En los sistemas de HVAC, siempre ha existido un enfoque dirigido a la selección de valores de temperatura. Los sistemas actuales se basan en termostatos fijados en una pared que reciben la elección de los usuarios mediante mandos a distancia, o en el propio aparato. Sin embargo, los edificios actuales disponen de redes wifi e infinidad de dispositivos de conexión vía web. Estos dispositivos permitirían controlar termostatos en cualquier lugar.

Cuando se pretende optimizar el confort y la eficiencia, decidir la temperatura de una sala, o cuándo se debe conectar o desconectar un HVAC, etc. es una tarea ardua. Además, la dificultad de esta tarea se ve incrementada cuando en la misma sala conviven más de un ocupante.

La sensación y los límites de confort entre usuarios no se pueden expresar con claridad, y la decisión común es generalmente conflictiva. Por esta razón es importante generar un modelo de confort de los usuarios, basado en las sensaciones frente a los valores mostrados por los sensores. El usuario no debe elegir la temperatura del HVAC, sino avisar de su estado de confort cuando lo crea conveniente por ser no aceptable.

Podrían estudiarse modelos y operativas de decisión sobre el espacio de valores susceptibles de ser seleccionados para un edificio. El desarrollo del modelo presentado está claramente justificado.

### **Selección del valor y reglas de economía**

Los nuevos modelos basados en el confort subjetivo, necesitarán a su vez de modelos que permitan decidir el valor que genere confort térmico y ahorro energético, en base a los valores obtenidos por los sensores y las encuestas. Es necesario desarrollar los modelos de confort que se diseñen y el estudio energético de los cambios en el HVAC. La aplicación presentada es un elemento que junto con otras reglas



permitiría encontrar los valores necesarios. Sin embargo, es necesario realizar estudios con los cuales generar las reglas de decisión desde el punto de vista energético, dado que mediante el modelo presentado podríamos obtener el valor que tiene para el usuario cada cambio en la temperatura.

## 20.2 Resultados alcanzados

Como consecuencia del trabajo realizado, esta tesis ha alcanzado una serie de resultados que merece la pena reseñar:

- Se ha realizado un estudio de la situación actual del problema y técnicas utilizadas, realizándose un estudio de la bibliográfica existente.
- Se han propuestos dos metodologías para su aplicación en el sector de la construcción.
- Respecto al segundo bloque de la tesis, se ha presentado un software, el programa SEDICAE, y se ha obtenido una patente: Aparicio P., Guadix J., Onieva L., Achedad P., Muñuzuri J., Álvarez A., Molina J., Salmerón J. y Sánchez F. (2013). Método, sistema y programa informático para la optimización energético-económica del diseño de un edificio. Oficina española de patentes, Solicitud de patente: P201200784.
- Algunos de estos resultados se encuentran publicados en revistas indexadas y en proceeding de congresos, tanto nacionales como internacionales. En la actualidad se encuentra en fase avanzada de revisión varios artículos. Entre los documentos presentados, destacan los siguientes:
  - Aparicio, P., Guadix, J., Salmerón, J., Sánchez, F.J.: An integrated optimization method for residential buildings design. Case Study in Spain. En: Energy and Buildings (Factor de impacto JCR: 2.679). 2014. (artículo aceptado y en espera para publicarse).
  - Aparicio Ruiz, Pablo, Guadix Martín, José, Onieva Giménez, Luis, Escudero Santana, Alejandro: Methodology for Analysis and Decision

## 20. CONCLUSIONES Y EXTENSIONES

---

- Making by Sampling in Buildings. En: Dirección y Organización (Factor de impacto SJR: 0.101). 2014. (artículo aceptado y en espera para publicarse).
- Aparicio Ruiz, Pablo, Guadix Martín, José, Muñuzuri Sanz, Jesús, Onieva Giménez, Luis: New model for the search for comfort through surveys. En: WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS and SYSTEMS (Factor de impacto SJR: 0.177). 2012. Vol. 11. Núm. 4. Pág. 125-135
  - Aparicio Ruiz, Pablo, Guadix Martín, José, Onieva Giménez, Luis, Rodríguez Palero, Maria: Optimización de la demanda de calefacción y análisis del coste del ciclo de vida de los edificios. En: Dirección y Organización (Factor de impacto SJR: 0.101). 2012. Vol. 1. Núm. 48. Pág. 23-28
  - Aparicio Ruiz, Pablo, Guadix Martín, José, Muñuzuri Sanz, Jesús, Onieva Giménez, Luis: Detecting Comfort-based Climate Settings Using Surveys. En: Lecture Notes in Engineering and Computer Science. 2011. Vol. 2191. Núm. 1. Pág. 1021-1026
  - Aparicio Ruiz, Pablo, Guadix Martín, José, Muñuzuri Sanz, Jesús, Onieva Giménez, Luis: Detecting Comfort-Based Climate Settings Using Surveys. Vol. II. Pág. 1021-1026. En: Proceedings of the World Congress on Engineering 2011. London, UK. Newswood Limited International Association of Engineers. 2011. ISBN 978-988-19251-4-5
  - Aparicio Ruiz, Pablo, Guadix Martín, José, Onieva Giménez, Luis: Estudio de Satisfacción del Confort para la Toma de Decisiones. Pág. 781-790. En: Ingeniería Industrial: Redes Innovadoras. Cartagena. Grupo de Ingeniería de Organización. 2011. ISBN 978-84-694-7124-1
  - Aparicio Ruiz, Pablo, Fernandez Valverde, Joaquin Rodrigo, Onieva Giménez, Luis: Sistema Experto Basado en la Lógica Difusa para la Detección de Configuraciones Climáticas Asociadas al Confort. En: Dirección y organización (Factor de impacto SJR: 0.101). 2010. Vol. 42. Pág. 5-11

# Referencias

- [AENOR, 1995] AENOR (1995). UNE-EN ISO 27243:1993. ambientes calurosos. estimación del estrés térmico del hombre en el trabajo basado en el índice wbgt (temperatura húmeda y temperatura de globo). *Asociación Española de Normalización y Certificación*. 348
- [AENOR, 2002] AENOR (2002). UNE-EN ISO 10551:1995. ergonomía del ambiente térmico. evaluación de la influencia del ambiente térmico empleando escalas de juicio subjetivo. *Asociación Española de Normalización y Certificación*. 348, 350, 401, 402
- [AENOR, 2006] AENOR (2006). UNE-EN ISO 7730:2005. ergonomía del ambiente térmico. determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices pmv y ppd y los criterios de bienestar térmico local. *Asociación Española de Normalización y Certificación*. 348
- [AENOR, 2008a] AENOR (2008a). UNE-EN 15316-1:2008. sistemas de calefacción en los edificios. método para el cálculo de los requisitos de energía del sistema y de la eficiencia del sistema. parte 1: Generalidades. 190
- [AENOR, 2008b] AENOR (2008b). UNE-EN 15603:2008. eficiencia energética de los edificios. consumo global de energía y definición de las evaluaciones energéticas. 189
- [AENOR, 2009] AENOR (2009). UNE-EN ISO 11079:2007. ergonomía del ambiente térmico. determinación e interpretación del estrés debido al frío empleando el aislamiento requerido de la ropa (ireq) y los efectos del enfriamiento local. *Asociación Española de Normalización y Certificación*. 348

## REFERENCIAS

---

- [AENOR, 2010] AENOR (2010). UNE-EN ISO 10077-1:2010. comportamiento térmico de ventanas, puertas y persianas. cálculo de la transmitancia térmica. parte 1: Generalidades. xxviii, 178
- [AENOR, 2011] AENOR (2011). UNE-EN ISO 13790:2011. eficiencia energética de los edificios. cálculo del consumo de energía para calefacción y refrigeración de espacios. 191
- [AENOR, 2012a] AENOR (2012a). UNE-CEN/TR 15615:2012. explicación de la relación general entre diversas normas europeas y la directiva relativa a la eficiencia energética de los edificios (epbd). documento paraguas. 189
- [AENOR, 2012b] AENOR (2012b). UNE-EN 15217:2012. eficiencia energética de los edificios. métodos para expresar la eficiencia energética y para la certificación energética de los edificios. 189
- [Akimoto et al., 2010] Akimoto, T., Tanabe, S.-i., Yanai, T., y Sasaki, M. (2010). Thermal comfort and productivity-evaluation of workplace environment in a task conditioned office. *Building and environment*, 45(1):45–50. 414
- [Almirall y Marcet, 1995] Almirall, H. y Marcet, C. (1995). Evolución de la temperatura corporal a lo largo del día, función de crecimiento y cronotipo. *Psicotema*, 7(2):317–326. 393
- [Alter, 1980] Alter, S. (1980). *Decision support systems: current practice and continuing challenges*. Addison-Wesley Pub. 43, 44, 46
- [Anderson et al., 2004] Anderson, C. W., Hittle, D., Kretchmar, M., Young, P., Si, J., Barto, A., Powell, W., y Wunsch, D. (2004). Robust reinforcement learning for heating, ventilation, and air conditioning control of buildings. *Handbook of Learning and Approximate Dynamic Programming*, pages 517–534. 343, 356
- [Arduino, 2013] Arduino (2013). Arduino project home page. Disponible en web: <http://www.arduino.cc/>. 371
- [Argiriou et al., 2000] Argiriou, A., Bellas-Velidis, I., y Balaras, C. (2000). Development of a neural network heating controller for solar buildings. *Neural networks*, 13(7):811–820. 328, 329, 343, 356

- [Argiriou et al., 2004] Argiriou, A., Bellas-Velidis, I., Kummert, M., y André, P. (2004). A neural network controller for hydronic heating systems of solar buildings. *Neural networks*, 17(3):427–440. 308, 329, 343, 356
- [ASHRAE, 1997] ASHRAE (1997). *Ashrae handbook fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. Chapter 8: Thermal comfort. xxi, 295, 296
- [ASHRAE, 2008] ASHRAE (2008). *Thermal environmental conditions for human occupancy, Standard 55*. American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers, Atlanta. 288, 395, 396
- [ASHRAE, 2004] ASHRAE, A. (2004). Standard 55-2004, thermal environmental conditions for human occupancy. atlanta: American society of heating, refrigerating, and air-conditioning engineers. Inc., USA. 266
- [ATECYR, 2007] ATECYR (2007). *RITE. Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios*. IDAE, Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración. 295
- [ATHENA, 2013] ATHENA (2013). Athena. Disponible en web: <http://www.athenasmi.org>. 159
- [Attia et al., 2013] Attia, S., Hamdy, M., O'Brien, W., y Carlucci, S. (2013). Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design. *Energy and Buildings*, 60(0):110–124. 252
- [Awbi, 2013] Awbi, H. B. (2013). *Ventilation of buildings*. Routledge. 368
- [Baker y Standeven, 1995] Baker, N. y Standeven, M. (1995). A behavioural approach to thermal comfort assessment in naturally ventilated buildings. *Proceedings of the CIBSE National Conference*, pages 76–84. 274
- [Bedford y Warner, 1934] Bedford, T. y Warner, C. (1934). The globe thermometer in studies of heating and ventilation. *Journal of Hygiene*, 34(4):458–473. 369

## REFERENCIAS

---

- [BEES, 2013] BEES (2013). Bees. Disponible en web: <http://www.bfrl.nist.gov/oae/software/bees>. 159
- [Bělohlávek y Klir, 2011] Bělohlávek, R. y Klir, G. J. (2011). *Concepts and fuzzy logic*. The MIT Press. 56
- [Biondo, 1990] Biondo, S. (1990). *Fundamentals of expert systems technology: principles and concepts*. Ablex Pub. 126
- [BOE, 2007] BOE, B. O. d. E. B. (2007). Real decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción. 183
- [Bowerman y Glover, 1989] Bowerman, R. y Glover, D. (1989). Putting expert systems into practice. *Van Nostrand Reinhold, P. O. Box 668, Florence, KY 41022-9979(USA), 1989, 402*. 13
- [Boyano et al., 2013] Boyano, A., Hernandez, P., y Wolf, O. (2013). Energy demands and potential savings in european office buildings: Case studies based on energypplus simulations. *Energy and Buildings*, 65(0):19 – 28. 248
- [Boyd, 1935] Boyd, E. (1935). *The growth of the surface area of the human body*. Monograph Series 10. University of Minnesota Press, Institute of Child Welfare. Minneapolis. 312
- [Brager y de Dear, 1998] Brager, G. S. y de Dear, R. J. (1998). Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and buildings*, 27(1):83–96. 415
- [BUILDER, 2013] BUILDER, D. (2013). Design builder. Disponible en web: <http://www.designbuilder.co.uk>. 158
- [CALENER, 2013] CALENER (2013). Calener. Disponible en web: <http://www.mityc.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/ProgramaCalener/Paginas/DocumentosReconocidos.aspx>. 157

- [Calvino et al., 2004] Calvino, F., La Gennusa, M., Rizzo, G., y Scaccianoce, G. (2004). The control of indoor thermal comfort conditions: introducing a fuzzy adaptive controller. *Energy and Buildings*, 36(2):97–102. xxii, 307, 308, 326, 343, 356
- [Caudana et al., 1995] Caudana, B., Conti, F., Helcke, G., y Pagani, R. (1995). A prototype expert system for large scale energy auditing in buildings. *Pattern recognition*, 28(10):1467–1475. xix, 139, 140
- [CEN, 2005] CEN, C. E. d. N. (2005). Energy Performance of Buildings. Methods for Expressing Energy Performance and for Energy Certification of Buildings, CEN EN 15217. 120
- [CEN, 2006] CEN, C. E. d. N. (2006). Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings, CEN EN 15251. 120
- [Chen, 2009] Chen, C. (2009). Evaluation of resistance–temperature calibration equations for NTC thermistors. *Measurement*, 42(7):1103–1111. 379
- [Cingolani, 2010] Cingolani, P. (2010). *Jfuzzylogic, a java package that implement fuzzy control language (fcl) specification*. (iec 1131p7). 394
- [Coello, 1995] Coello, C. (1995). Introducción a los algoritmos genéticos. *Soluciones Avanzadas. Tecnologías de Información*, 3(17):5–11. 96
- [Coen et al., 1998] Coen, M. y others (1998). Design principles for intelligent environments. *Proceedings of the national conference on artificial intelligence*, pages 547–554. 337
- [Comunidad Europea, 2003] Comunidad Europea, C. (2003). *DIRECTIVA 2002/91/CE del parlamento europeo y del consejo de 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. 121
- [Cordón García et al., 2002] Cordón García, O., Herrera, F., y Stützle, T. (2002). A review on the ant colony optimization metaheuristic: Basis, models and new trends. *Mathware & Soft Computing*, 9(3):141–175. 91

## REFERENCIAS

---

- [Cormen et al., 2009] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., y Stein, C. (2009). Introduction to algorithms. *Possíveis Questionamentos*. 77
- [Cortés et al., 2008] Cortés, P., García, J. M., Muñuzuri, J., y Onieva, L. (2008). Viral systems: A new bio-inspired optimisation approach. *Computers & Operations Research*, 35(9):2840–2860. 90
- [Croome et al., 1994] Croome, D., Gan, G., y Awbi, H. (1994). Thermal comfort and air quality in naturally ventilated offices: Case study. *Building Services Research and Technology*, 15(3):21–40. 265
- [Current, 1998] Current, J. D. (1998). A linear equation for estimating the body surface area in infants and children. *Internet J Anesthesiol*, 2(2). 314
- [Dalamagkidis et al., 2007] Dalamagkidis, K., Kolokotsa, D., Kalaitzakis, K., y Stavrakakis, G. (2007). Reinforcement learning for energy conservation and comfort in buildings. *Building and environment*, 42(7):2686–2698. 308, 328, 343, 356
- [Darlington, 2000] Darlington, K. (2000). *The essence of expert systems*. Pearson Education India. 14
- [Dascalaki et al., 2010] Dascalaki, E., Droutsa, K., Gaglia, A., Kontoyiannidis, S., y Balaras, C. (2010). Data collection and analysis of the building stock and its energy performance - an example for hellenic buildings. *Energy and Buildings*, 42(8):1231–1237. 154
- [D'Ausilio, 2012] D'Ausilio, A. (2012). Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment. *Behavior research methods*, 44(2):305–313. 372
- [Davidsson y Boman, 2005] Davidsson, P. y Boman, M. (2005). Distributed monitoring and control of office buildings by embedded agents. *Information Sciences*, 171(4):293–307. 333, 343, 356
- [Davis, 1986] Davis, G. (1986). *Building performance: function, preservation, and rehabilitation*, volume 901. Astm Intl. 126



- [de Dear y Brager, 1998] de Dear, R. J. y Brager, G. S. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, 104(Pt 1A):145–167. 274, 275
- [De Groot et al., 1999] De Groot, E., Mallory-Hill, S., Van Zutphen, R., y De Vries, B. (1999). A decision support system for preliminary design. *Eighth International Conference on Durability of Building Materials and Components*, 8 dbmc, pages 970–979. xix, 145, 146
- [De Santoli y Felici, 2005] De Santoli, L. y Felici, G. (2005). Use of an expert system rating for the energy performance of a building. *Building Services Engineering Research and Technology*, 26(4):349–360. xviii, xix, 134, 135, 136, 137
- [DeDear et al., 1997] DeDear, R., Brager, G., y Cooper, D. (1997). *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference: Final Report [on] ASHRAE RP-884*. Macquarie Research Limited. 275
- [Dhaliwal y Benbasat, 1996] Dhaliwal, J. y Benbasat, I. (1996). The use and effects of knowledge-based system explanations: theoretical foundations and a framework for empirical evaluation. *Information systems research*, 7(3):342–362. 29
- [Dixon et al., 2008] Dixon, T., Keeping, M., y Roberts, C. (2008). Facing the future: energy performance certificates and commercial property. *Journal of Property Investment & Finance*, 26(1):96–100. 125
- [Doctor et al., 2005] Doctor, F., Hagraas, H., y Callaghan, V. (2005). A fuzzy embedded agent-based approach for realizing ambient intelligence in intelligent inhabited environments. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 35(1):55–65. 328, 343, 356
- [Dounis y Caraiscos, 2007] Dounis, A. y Caraiscos, C. (2007). Intelligent coordinator of fuzzy controller-agents for indoor environment control in buildings using 3-d fuzzy comfort set. *Fuzzy Systems Conference, 2007. FUZZ-IEEE 2007. IEEE International*, pages 1–6. 328, 343, 356

## REFERENCIAS

---

- [Dounis y Caraiscos, 2008] Dounis, A. y Caraiscos, C. (2008). Fuzzy comfort and its use in the design of an intelligent coordinator of fuzzy controller–agents for environmental conditions control in buildings. *Journal of Uncertain Systems*, 2(2):101–112. 328, 340, 341, 343, 356
- [Dounis y Manolakis, 2001] Dounis, A. y Manolakis, D. (2001). Design of a fuzzy system for living space thermal-comfort regulation. *Applied Energy-Kidlington*, 69(2):119–144. 328, 343, 356
- [Dounis y Caraiscos, 2009] Dounis, A. I. y Caraiscos, C. (2009). Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment? a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6):1246–1261. 312
- [Druet et al., 2012] Druet, L., Bocanegra-Yáñez, M., Ordóñez-Ordóñez, N., y Santiago-Villar, J. (2012). *Guía de edificios residenciales de alta calificación energética e integración de energías renovables*. Fundación HABITEC, Málaga. xix, xx, 169, 170, 171, 177, 178
- [Du Bois y Du Bois, 1916] Du Bois, D. y Du Bois, E. F. (1916). Clinical calorimetry: tenth paper a formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Archives of internal medicine*, 17(6-2):863. 312
- [Duangsuwan y Liu, 2008] Duangsuwan, J. y Liu, K. (2008). Multi-agent control of shared zones in intelligent buildings. *Computer Science and Software Engineering, 2008 International Conference on*, 1:1238–1241. 334, 341, 343, 356
- [Duangsuwan y Liu, 2009] Duangsuwan, J. y Liu, K. (2009). Normative multi-agent system for intelligent building control. *Knowledge Engineering and Software Engineering, 2009. KESE'09. Pacific-Asia Conference on*, pages 197–200. 335, 336, 337, 341, 343, 356
- [Durkin, 1990] Durkin, J. (1990). Research review: Application of expert systems in the sciences. *The Ohio Journal of Science*, 90(5):171–179. 15, 25

## REFERENCIAS

---

- [Eastman et al., 2008] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., y Liston, K. (2008). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, architects, engineers, contractors, and fabricators*. John Wiley and Sons, Hoboken, NJ. 122, 234
- [ECO-QUANTUM, 2013] ECO-QUANTUM (2013). Eco-quantum. Disponible en web: <http://www.ivam.uva.nl/index.php?id=171>. 159
- [ECOTECH, 2013] ECOTECH (2013). Ecotech. Disponible en web: <http://ecotech.com>. 158
- [Egilegor et al., 1997] Egilegor, B., Uribe, J., Arregi, G., Pradilla, E., y Susperregi, L. (1997). A fuzzy control adapted by a neural network to maintain a dwelling within thermal comfort. *Proceedings of Building Simulation*, 97:87–94. 308, 328, 343, 356
- [EN15251, 2007] EN15251, C. S. (2007). Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. *Thermal Environment, Lighting and Acoustics, AFNOR, Paris, France*. 275
- [Eng et al., 2003] Eng, K., Klein, D., Bähler, A., Bernardet, U., Blanchard, M., Costa, M., Delbrück, T., Douglas, R., Hepp, K., Manzolli, J., y others (2003). Design for a brain revisited: the neuromorphic design and functionality of the interactive spaceáda'. *Reviews in the Neurosciences*, 14(1-2):145. 337
- [ENTRANZE project, 2013] ENTRANZE project (2013). Entranze project, policies to enforce the transition to nearly zero-energy buildings in europe. Disponible en web: <http://www.entranze.enerdata.eu/>. xviii, 121
- [ENVEST2, 2013] ENVEST2 (2013). Envest2. Disponible en web: <http://envestv2.bre.co.uk>. 159
- [EPA, 2003] EPA (2003). *Indoor Air Quality and Student Performance*. Environmental Protection Agency (United States). Washington: Indoor Environments Division Office of Radiation and Indoor Air. 288

## REFERENCIAS

---

- [EPS-r, 2013] EPS-r (2013). Eps-r. Disponible en web: <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>. 158
- [Etzioni, 1996] Etzioni, O. (1996). Moving up the information food chain: Deploying softbots on the world wide web. *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, pages 1322–1326. 100
- [European Commission and others, 2012] European Commission and others (2012). supplementing directive 2010/31/eu of the european parliament and of the council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements. *Official Journal of the European Union*, 81:18–36. 243, 244
- [European Union, 2012] European Union (2012). The energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements. directive 2010/31/eu. delegated regulation (eu) no 244/2012 of 16 january 2012 supplementing. 207
- [Eweda et al., 2010] Eweda, A., Zayed, T., y Alkass, S. (2010). An integrated condition assessment model for buildings. *Construction Research Congress 2010. Innovation for Reshaping Construction Practice*. xix, 143, 144, 145
- [Feigenbaum et al., 1988] Feigenbaum, E., McCorduck, P., y Nii, P. (1988). The rise of the expert company: How visionary companies are using expert systems to make huge profits. 15
- [Feigenbaum, 1982] Feigenbaum, E. A. (1982). *Knowledge Engineering in the 1980's*. Department of Computer Science, Stanford University, Sanford, CA. 13
- [Feo y Resende, 1995] Feo, T. y Resende, M. (1995). Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of Global Optimization*, 6(2):109–133. 88

- [Fernández et al., 2009] Fernández, J., Cortés, P., y Delgado, M. (2009). Controlador basado en lógica difusa para la detección del patrón de tráfico en sistemas de transporte vertical. *XIII Congreso de Ingeniería de Organización*, pages 647–656. 394
- [Finlay, 1989] Finlay, P. (1989). *Introducing decision support systems*. NCC Blackwell. 40
- [Forgionne, 2000] Forgionne, G. (2000). Decision-making support system effectiveness: The process to outcome link. *Information Knowledge Systems Management*, 2(2):169–188. 47
- [Free and open source software community, 2010] Free and open source software community (2010). Eclipse IDE, 3.6.2. 246
- [Freeman y Skapura, 1993] Freeman, J. y Skapura, D. (1993). *Redes neuronales: Algoritmos, aplicaciones y técnicas de programación*. Addison-Wesley. 64
- [Fujimoto y Watanabe, 1969] Fujimoto, S. y Watanabe, T. (1969). Studies on the body surface area of japanese. *Acta medica Nagasakiensia*, 14(1-2):1–13. 312
- [Fumo et al., 2010] Fumo, N., Mago, P., y Luck, R. (2010). Methodology to estimate building energy consumption using energyplus benchmark models. *Energy and Buildings*, 42(12):2331 – 2337. 199
- [Galindo et al., 2006] Galindo, J., Urrutia, A., y Piattini, M. (2006). *Fuzzy databases: Modeling, design, and implementation*. IGI Global. 62
- [García et al., 2002] García, M., Quintales, L., y García, F. (2002). Obtención y validación de modelos de estimación de software mediante técnicas de minería de datos. *Revista colombiana de computación*, 3(1):53–71. 37
- [Gehan y George, 1970] Gehan, E. A. y George, S. L. (1970). Estimation of human body surface area from height and weight. *Cancer chemotherapy reports. Part 1*, 54(4):225–235. 312
- [Giarratano et al., 2001] Giarratano, J., Riley, G., y Pineda, E. (2001). *Sistemas expertos: Principios y programación*. Thomson. xvii, 13, 15, 18, 20

## REFERENCIAS

---

- [Giarratano y Riley, 2004] Giarratano, J. C. y Riley, G. D. (2004). *Expert Systems: Principles And Programming, Fourth Edition*. Course Technology. 19
- [Gil Aluja, 2005] Gil Aluja, J. (2005). La matemática borrosa en economía y gestión de empresas. *Matematicalia: revista digital de divulgación matemática de la Real Sociedad Matemática Española*, 1(3):5. 54
- [Glover, 1998] Glover, F. (1998). A template for scatter search and path relinking. *Artificial evolution*, pages 1–51. 92
- [Glover y Laguna, 1998] Glover, F. y Laguna, M. (1998). *Tabu search*, volume 1. Springer. 82, 124
- [Gobierno de España, 2006] Gobierno de España (2006). Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Royal Decree 314/2006, approved 17th on May, in which Technical Building Code for Spain is approved. 120
- [Gómez Sanz, 2003] Gómez Sanz, J. (2003). Metodologías para el diseño de sistemas multi-agente. *Inteligencia artificial: Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 7(18):51–64. xxvii, 111
- [González et al., 2011] González, A. B. R., Díaz, J. J. V., Caamaño, A. J., y Wilby, M. R. (2011). Towards a universal energy efficiency index for buildings. *Energy and Buildings*, 43(4):980 – 987. 243
- [Gouda et al., 2006] Gouda, M., Danaher, S., y Underwood, C. (2006). Quasi-adaptive fuzzy heating control of solar buildings. *Building and environment*, 41(12):1881–1891. xxii, 331, 343, 356
- [Graham, 1996] Graham, I. (1996). *Métodos orientados a objetos*. Ediciones Diaz De Santos SA. 33
- [Griffiths, 1990] Griffiths, I. (1990). Thermal comfort studies in buildings with passive solar features. *Field Studies. Report to the Commission of the European Community, ENS35*, 90. 264

- [Grosan y Abraham, 2011] Grosan, C. y Abraham, A. (2011). Rule-based expert systems. *Intelligent Systems*, 17:149–185. 26
- [Gu et al., 1999] Gu, Q., Bédard, C., y Zmeureanu, R. (1999). Building energy code advisor. *Building Simulation*, pages 1117–1121. 148, 149
- [Guadix et al., 2012] Guadix, J., Onieva, L., Achedad, P., Muñuzuri, J., Aparicio, P., Álvarez, A., Molina, J., Salmerón, J., y Sánchez, F. (2012). Método, sistema y programa informático para la optimización energético-económica del diseño de un edificio. *Oficina española de patentes, P201200784*. Disponible en web: <http://www.oepm.es>. 124, 199
- [Guillemin y Molteni, 2002] Guillemin, A. y Molteni, S. (2002). An energy-efficient controller for shading devices self-adapting to the user wishes. *Building and Environment*, 37(11):1091–1097. 328, 343, 356
- [Hagras et al., 2003] Hagras, H., Callaghan, V., Colley, M., y Clarke, G. (2003). A hierarchical fuzzy–genetic multi-agent architecture for intelligent buildings online learning, adaptation and control. *Information Sciences*, 150(1):33–57. 283, 328, 340, 341, 343, 356
- [Hagras et al., 2004] Hagras, H., Callaghan, V., Colley, M., Clarke, G., Pounds-Cornish, A., y Duman, H. (2004). Creating an ambient-intelligence environment using embedded agents. *Intelligent Systems, IEEE*, 19(6):12–20. 328, 340, 341, 343, 356
- [Hamdi y Lachiver, 1998] Hamdi, M. y Lachiver, G. (1998). A fuzzy control system based on the human sensation of thermal comfort. *Fuzzy Systems Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on*, 1:487–492. 328, 356
- [HAP, 2013] HAP (2013). Hap. Disponible en web: [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory). 157
- [Harmon y King, 1985] Harmon, P. y King, D. (1985). *Expert systems*. John Wiley & Sons, Inc. 16

## REFERENCIAS

---

- [Harrison et al., 1998] Harrison, A., Loe, E., y Read, J. (1998). *Intelligent Buildings in South East Asia*. Taylor & Francis. 283
- [Haycock et al., 1978] Haycock, G. B., Schwartz, G. J., y Wisotsky, D. H. (1978). Geometric method for measuring body surface area: a height-weight formula validated in infants, children, and adults. *The Journal of pediatrics*, 93(1):62–66. 312
- [Hernandez y Kenny, 2010] Hernandez, P. y Kenny, P. (2010). From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (lc-zeb). *Energy and Buildings*, 42(6):815 – 821. 181
- [Hilera y Martínez, 1995] Hilera, J. y Martínez, V. (1995). Redes neuronales artificiales: fundamentos, modelos y aplicaciones. *Madrid: Ra-ma*. 64, 66
- [Hill, 1997] Hill, S. (1997). *Intelligent Tools for Strategic Performance Evaluation of Office Buildings*. Internal report, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands. xix, 146, 147
- [Holland, 1975] Holland, J. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor. xviii, 96, 97
- [Holland, 1992] Holland, J. (1992). Genetic algorithms. *Scientific American*, 267(1):44–50. 93
- [Homod et al., 2012] Homod, R. Z., Sahari, K. S. M., Almurib, H. A., y Nagi, F. H. (2012). RLF and TS fuzzy model identification of indoor thermal comfort based on PMV/PPD. *Building and Environment*, 49(0):141 – 153. 328, 343, 356
- [Hopfield, 1982] Hopfield, J. J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the national academy of sciences*, 79(8):2554–2558. 74
- [Hribernik et al., 2011] Hribernik, K. A., Ghairi, Z., Hans, C., y Thoben, K.-D. (2011). Co-creating the internet of things - first experiences in the participatory design of intelligent products with arduino. *Concurrent Enterprising (ICE), 2011 17th International Conference on*, pages 1–9. 372



## REFERENCIAS

---

- [Hu, 1987] Hu, S. (1987). *Expert systems for software engineers and managers*. Chapman & Hall. 126
- [Huang y Lam, 1997] Huang, W. y Lam, H. (1997). Using genetic algorithms to optimize controller parameters for hvac systems. *Energy and Buildings*, 26(3):277–282. 333, 343, 356
- [Huhns y Stephens, 2000] Huhns, M. y Stephens, L. (2000). Multiagent systems and societies of agents. 35
- [Huizenga et al., 2002] Huizenga, C., Laeser, K., y Arens, E. (2002). A web-based occupant satisfaction survey for benchmarking building quality. *Proceedings of Indoor Air conference 2002*. 415
- [Humphreys, 1998] Humphreys, J. (1998). Understanding the adaptive approach to thermal comfort. *ASHRAE Trans.*, 104(1). 275
- [Humphreys, 1978] Humphreys, M. (1978). Outdoor temperatures and comfort indoors. *Batiment International, Building Research and Practice*, 6(2):92–92. xxi, 273, 274, 275
- [Humphreys, 2008] Humphreys, M. (2008). “why did the piggy bark?” some effects of language and context on the interpretation of words used in scales of warmth and thermal preference. *Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge Conference (Cumberland Lodge), Windsor, UK*. 349, 402
- [Humphreys et al., 2013] Humphreys, M., Rijal, H., y Nicol, J. (2013). Updating the adaptive relation between climate and comfort indoors; new insights and an extended database. *Building and Environment*, 63(0):40–55. 276
- [Humphreys, 1974] Humphreys, M. A. (1974). Environmental temperature and thermal comfort. *Building Services Engineer*, 1(42):77–81. 381, 385
- [Humphreys, 1977] Humphreys, M. A. (1977). The optimum diameter for a globe thermometer for use indoors. *Annals of Occupational Hygiene*, 20(2):135–140. 369, 370

## REFERENCIAS

---

- [IDEA, 2007] IDEA (2007). *Plan de acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética de España (PAE4+)*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. xxi, 280
- [IDEA, 2011] IDEA (2011). *Análisis del consumo energético del sector residencial en España*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. xxi, 281
- [ISO 7730, 1994] ISO 7730 (1994). *ISO 7730: Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort*. International Organization for Standardization (ISO). 266
- [Jaksch y Rudy, 2005] Jaksch, S. y Rudy, M. (2005). An ontological decision support system for the design of structural simulation models. *Proceedings of 3iA'2005: International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence*, pages 189–196. 152
- [Jones et al., 1994] Jones, P., Baker, A., Hardy, C., y Mowat, A. (1994). Measurement of body surface area in children with liver disease by a novel three-dimensional body scanning device. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 68(6):514–518. 314
- [Kanakarachos y Geramanis, 1998] Kanakarachos, A. y Geramanis, K. (1998). Multi-variable control of single zone hydronic heating systems with neural networks. *Energy conversion and management*, 39(13):1317–1336. 343, 356
- [Kaur et al., 2013] Kaur, E. N., Rekhi, E. N. S., y Nayyar, A. (2013). Review of expert systems based on fuzzy logic. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2(3):1334–1339. 56
- [Keats, 2006] Keats, J. (2006). John Koza has built an invention machine. *Popular Science*. May. 98
- [Keen, 1980] Keen, P. (1980). Decision support systems: a research perspective. *Decision support systems: issues and challenges*. G. Fick and RH Sprague. Oxford. 41

- [Kennedy, 1999] Kennedy, J. (1999). Small worlds and mega-minds: effects of neighborhood topology on particle swarm performance. *Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on*, 3. 92
- [Khandelwal et al., 2011] Khandelwal, A., Talukdar, P., y Jain, S. (2011). Energy savings in a building using regenerative evaporative cooling. *Energy and Buildings*, 43(2):581–591. 420
- [Kirkpatrick et al., 1983] Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C., y Vecchi, M. (1983). Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598):671–680. 82
- [Klein et al., 2012] Klein, L., young Kwak, J., Kavulya, G., Jazizadeh, F., Becerik-Gerber, B., Varakantham, P., y Tambe, M. (2012). Coordinating occupant behavior for building energy and comfort management using multi-agent systems. *Automation in Construction*, 22(0):525 – 536. Planning Future Cities-Selected papers from the 2010 eCAADe Conference. 341, 343, 356
- [Kohonen, 1982] Kohonen, T. (1982). Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological cybernetics*, 43(1):59–69. 75
- [Kolodner, 1993] Kolodner, J. (1993). *Case-based reasoning*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann. 34
- [Kolokotsa, 2003] Kolokotsa, D. (2003). Comparison of the performance of fuzzy controllers for the management of the indoor environment. *Building and environment*, 38(12):1439–1450. 303, 308, 328, 343, 356
- [Kolokotsa et al., 2002] Kolokotsa, D., Stavrakakis, G., Kalaitzakis, K., y Agoris, D. (2002). Genetic algorithms optimized fuzzy controller for the indoor environmental management in buildings implemented using PLC and local operating networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 15(5):417–428. 328, 343, 356
- [Kolokotsa et al., 2001] Kolokotsa, D., Tsiavos, D., Stavrakakis, G., Kalaitzakis, K., y Antonidakis, E. (2001). Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildingsóoccupants thermal–visual comfort and indoor air quality satisfaction. *Energy and buildings*, 33(6):531–543. 328, 343, 356

## REFERENCIAS

---

- [Koza, 1994] Koza, J. (1994). *Genetic programming II: Automatic discovery of reusable programs*. MIT Press (Cambridge, Mass.). 97
- [Krainier, 1996] Krainier, A. (1996). Towards smart buildings. Architectural Asian Graduate School. Environment and Energy Studies Program. 281
- [Kurnitski et al., 2011] Kurnitski, J., Saari, A., Kalamees, T., Vuolle, M., Niemelä, J., y Tark, T. (2011). Cost optimal and nearly zero (nzeb) energy performance calculations for residential buildings with {REHVA} definition for nzeb national implementation. *Energy and Buildings*, 43(11):3279 – 3288. 180
- [Laudon y Laudon, 2002] Laudon, K. y Laudon, J. (2002). *Knowledge management, the central management focus for intelligent-acting organization*. Prentice Hall, Englewood cliffs, NJ, 5 th edition. 29, 37
- [Levermore, 1992] Levermore, G. J. (1992). *Building energy management systems: an application to heating and control*. E & FN Spon. 343
- [Liang y Du, 2005] Liang, J. y Du, R. (2005). Thermal comfort control based on neural network for hvac application. *Control Applications, 2005. CCA 2005. Proceedings of 2005 IEEE Conference on*, pages 819–824. 328, 344, 356
- [Liang y Du, 2008] Liang, J. y Du, R. (2008). Design of intelligent comfort control system with human learning and minimum power control strategies. *Energy conversion and management*, 49(4):517–528. 328, 344, 357
- [Liao, 2005] Liao, S. (2005). Expert system methodologies and applications: a decade review from 1995 to 2004. *Expert systems with applications*, 28(1):93–103. 38
- [Lindley, 1987] Lindley, D. V. (1987). The probability approach to the treatment of uncertainty in artificial. *Intelligence and expert systems*, 2(1):17–24. 32
- [LISA, 2013] LISA (2013). Lisa. Disponible en web: <http://www.lisa.au.com>. 160
- [Little, 2004] Little, J. (2004). Models and managers: The concept of a decision calculus. *Management science*, pages 1841–1853. 40

- [Liu y Dix, 1997] Liu, K. y Dix, A. (1997). Norm governed agents in cscw. *The First International Workshop on Computational Semiotics*. 336
- [Loga y Diefenbach, 2009] Loga, T. y Diefenbach, N. (2009). Datamine—collecting data from energy certification to monitor performance indicators for new and existing buildings. *Final report, 197p*. xix, 153, 155
- [Loh et al., 2010] Loh, E., Crosbie, T., Dawood, N., y Dean, J. (2010). *A framework and decision support system to increase building life cycle energy performance*. ITcon. xix, 147, 148
- [Loh et al., 2008] Loh, E., Dawood, N., y Dean, J. (2008). Development of framework for 3d-environmental assessment trade-off tool (3d-eatt). *8th CONVR 2008t, K.L, Malaysia*. 148
- [Loh et al., 2009] Loh, E., Dawood, N., Dean, J., y Crosbie, T. (2009). Development of trade-off algorithm with ahp for building lifecycle cost and environment impact assessment, paper proceeding for sue-mot conference. *2nd International Conference on Whole Life Urban Sustainability and its assessment, 22nd-24th April, Loughborough, UK*. 148
- [Looi, 1992] Looi, C. (1992). Neural network methods in combinatorial optimization. *Computers & operations research*, 19(3-4):191–208. 62
- [Lourenço et al., 2003] Lourenço, H., Martin, O., y Stützle, T. (2003). Iterated local search. *Handbook of metaheuristics*, pages 320–353. 89
- [López-Paredes et al., 2002] López-Paredes, A., Hernández-Iglesias, C., y Gutiérrez, J. P. (2002). Towards a new experimental socio-economics: Complex behaviour in bargaining. *Journal of Socio-Economics*, 31(4):423–429. 36
- [Luck et al., 2003] Luck, M., McBurney, P., y Preist, C. (2003). *Agent technology: enabling next generation computing (a roadmap for agent based computing)*. AgentLink/University of Southampton. 99
- [Álvarez, 1986] Álvarez, S. (1986). *Tesis Doctoral: Análisis dinámico del comportamiento térmico de edificios*. Universidad de Sevilla. 164

## REFERENCIAS

---

- [Álvarez et al., 2012] Álvarez, S., Molina, J., Sánchez, F., y Salmerón, J. (2012). Guía idae: Manual de fundamentos técnicos de calificación energética de edificios existentes ce3, documento reconocido para la certificación energética de edificios existentes, instituto para la diversificación y el ahorro de energía. 124, 199
- [Magnier y Haghighat, 2010] Magnier, L. y Haghighat, F. (2010). Multiobjective optimization of building design using trnsys simulations, genetic algorithm, and artificial neural network. *Building and Environment*, 45(3):739–746. xxii, 312, 332, 344, 357, 392
- [Maldonado, 2010] Maldonado, E. (2010). *Implementing the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) - Featuring Country Reports*. Community's Intelligent Energy Europe programme under the contract IEE/CA/07/333. xix, 165, 166
- [Malkawi y Srinivasan, 2007] Malkawi, A. y Srinivasan, R. (2007). Energy based decision support system for facilities management: Integration of data/web mining, knowledge base and thermal simulation. *Building Simulation*, pages 1557–1563. 152
- [Mamdani, 1977] Mamdani, E. (1977). Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. *Computers, IEEE Transactions on*, 100(12):1182–1191. 54
- [Mardjono, 2002] Mardjono, F. (2002). *A bamboo building design decision support tool*. Technische Universiteit Eindhoven. 151
- [Marinakis et al., 2013] Marinakis, V., Karakosta, C., Doukas, H., Androulaki, S., y Psarras, J. (2013). A building automation and control tool for remote and real time monitoring of energy consumption. *Sustainable Cities and Society*, 6(0):11 – 15. 392
- [Martí, 2003] Martí, R. (2003). Multi-start methods. *Handbook of metaheuristics*, pages 355–368. 90

## REFERENCIAS

---

- [Martinez y Britos, 2004] Martinez, R. y Britos, P. (2004). *Ingeniería de sistemas expertos*. Nueva Librería. 13
- [Matkar y Parab, 2011] Matkar, R. y Parab, A. (2011). Ontology based expert systems–replication of human learning. *Thinkquest 2010*, pages 43–47. 36
- [McCartney y Nicol, 2002] McCartney, K. J. y Nicol, J. F. (2002). Developing an adaptive control algorithm for europe. *Energy and buildings*, 34(6):623–635. 275, 357
- [McCulloch y Pitts, 1943] McCulloch, W. y Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of mathematical biology*, 5(4):115–133. 65, 70
- [McFadden et al., 2001] McFadden, F., Hoffer, J., y Prescott, M. (2001). *Modern Database Management*. Prentice Hall PTR. 37
- [Meir et al., 2009] Meir, I., Garb, Y., Jiao, D., y Cicelsky, A. (2009). Post-occupancy evaluation: an inevitable step toward sustainability. *Advances in Building Energy Research*, 3(1):189–219. 361
- [Michie, 1973] Michie, D. (1973). Knowledge engineering. *Kybernetes*, 2(4):197–200. 18
- [Ministerio de Fomento, 2011] Ministerio de Fomento (2011). Zonificación climática en función de la radiación solar global media diaria anual. 165
- [Ministerio de Fomento, 2013] Ministerio de Fomento (2013). Documento básico de ahorro de energía. artículo 15.1, exigencia básica de 1: Limitación de demanda energética. Disponible en web: <http://www.codigotecnico.org>. 120, 123
- [Ministerio de industria, energía y turismo, 2013] Ministerio de industria, energía y turismo (2013). Memoria de cálculo correspondiente a la opción simplificada para la calificación de eficiencia energética de edificios de viviendas. xx, 226, 227

## REFERENCIAS

---

- [Mitchell et al., 2011] Mitchell, R., Kohler, C., Curcija, D., Zhu, L., Vidanovic, S., Czarnecki, S., y Arasteh, D. (2011). Therm 6.3: Program description. a pc program for analyzing the two-dimensional heat transfer through building products. *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 1. xix, 174
- [Mladenovic y Hansen, 1997] Mladenovic, N. y Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, 24(11):1097–1100. 89
- [Mo y Mahdavi, 2003] Mo, Z. y Mahdavi, A. (2003). *An agent-based simulation-assisted approach to bi-lateral building systems control*. Proc. 8th Int. IBPSA Conf. 340, 341, 344, 357
- [Mondelo y Universal, 1999] Mondelo, P. R. y Universal, M. (1999). *Ergonomía 2: confort y estrés térmico*. Edicions UPC. xxv, 419
- [Mookerjee y Mannino, 1997] Mookerjee, V. y Mannino, M. (1997). Sequential decision models for expert system optimization. *Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on*, 9(5):675–687. 34
- [Moon y Kim, 2010] Moon, J. y Kim, J. (2010). Ann-based thermal control models for residential buildings. *Building and Environment*, 45(7):1612–1625. xxii, 312, 329, 330, 344, 357
- [Moon, 2012] Moon, J. W. (2012). Performance of ann-based predictive and adaptive thermal-control methods for disturbances in and around residential buildings. *Building and Environment*, 48:15–26. 312
- [Morel et al., 2001] Morel, N., Bauer, M., El-Khoury, M., y Krauss, J. (2001). Neurobat, a predictive and adaptive heating control system using artificial neural networks. *International journal of solar energy*, 21(2-3):161–201. 328, 344, 357
- [Mosteller, 1987] Mosteller, R. (1987). Simplified calculation of body-surface area. *The New England journal of medicine*, 317(17):1098. 312



- [Mozer, 1998] Mozer, M. (1998). *The Neural Network House: An Environment that Adapts to its Inhabitants*. Proc. AAAI Spring Symp. Intelligent Environments. 339
- [Mozer, 1999] Mozer, M. (1999). An intelligent environment must be adaptive. *Intelligent Systems and their Applications, IEEE*, 14(2):11–13. 339
- [Mühlenbein, 1997] Mühlenbein, H. (1997). The equation for response to selection and its use for prediction. *Evolutionary Computation*, 5(3):303–346. 91
- [Nassif et al., 2004] Nassif, N., Kaji, S., y Sabourin, R. (2004). Two-objective on-line optimization of supervisory control strategy. *Building Services Engineering Research and Technology*, 25(3):241–251. 333, 344, 357
- [Naylor, 1987] Naylor, C. (1987). *Build your own expert system*. Halsted Press. 14
- [Nicol y Humphreys, 2010] Nicol, F. y Humphreys, M. (2010). Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in european standard en15251. *Building and Environment*, 45(1):11–17. 357
- [Nicol et al., 2012] Nicol, F., Humphreys, M. A., y Roaf, S. (2012). *Adaptive thermal comfort: principles and practice*. Routledge New York. 275
- [Nicol y Humphreys, 1973] Nicol, J. F. y Humphreys, M. A. (1973). *Thermal comfort as part of a self-regulating system*. Taylor & Francis. 275
- [Nicol y Humphreys, 2002] Nicol, J. F. y Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and buildings*, 34(6):563–572. 273
- [Nikolopoulou et al., 1999] Nikolopoulou, M., Baker, N., y Steemers, K. (1999). Improvements to the globe thermometer for outdoor use. *Architectural Science Review*, 42(1):27–34. 370
- [OMS, 2009] OMS (2009). Health topics: Mental health. Organización Mundial de la Salud. 288

## REFERENCIAS

---

- [Oracle, 2010] Oracle (2010). Java SE Development Kit, Java 1.6.0. 246
- [Orosa y Oliveira, 2011] Orosa, J. A. y Oliveira, A. C. (2011). A new thermal comfort approach comparing adaptive and PMV models. *Renewable Energy*, 36(3):951 – 956. 274
- [Picaza et al., 2001] Picaza, J., Sobrado, F., García, J., y Ocariz, C. (2001). Melsis: un marco de trabajo para la construcción de sistemas de ayuda a la toma de decisiones en problemas de monitorización. *ADIS*. 39, 46
- [PLUS, 2013] PLUS, E. (2013). Energy plus. Disponible en web: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>. 157
- [Prechelt, 2000] Prechelt, L. (2000). An empirical comparison of c, c++, java, perl, python, rexx and tcl. *IEEE Computer*, 33(10):23–29. 112
- [Pérez-Lombard et al., 2009] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., González, R., y Maestre, I. (2009). A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. *Energy and Buildings*, 41(3):272–278. xx, 223, 224
- [Proyecto SECH-SPAHOUSEC, 2011] Proyecto SECH-SPAHOUSEC (2011). Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE). análisis del consumo energético del sector residencial en España. xviii, 123
- [Qiao et al., 2006] Qiao, B., Liu, K., y Guy, C. (2006). A multi-agent system for building control. *Proceedings of the IEEE/WIC/ACM international conference on Intelligent Agent Technology*, pages 653–659. 340, 341, 344, 357
- [Rafiq et al., 2003] Rafiq, M., Mathews, J., y Bullock, G. (2003). Conceptual building design-evolutionary approach. *Journal of computing in civil engineering*, 17:150. 151
- [Raidl, 2005] Raidl, G. (2005). Evolutionary computation: An overview and recent trends. *ÖGAI Journal*, 24. 98

## REFERENCIAS

---

- [Raja y Nicol, 1997] Raja, I. A. y Nicol, F. (1997). A technique for recording and analysis of postural changes associated with thermal comfort. *Applied ergonomics*, 28(3):221–225. 274
- [Ramesh et al., 2010] Ramesh, T., Prakash, R., y Shukla, K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42(10):1592 – 1600. 181
- [Reilly et al., 2013] Reilly, D., Duffy, A., Willis, D., y Conlon, M. (2013). Development and implementation of a simplified residential energy asset rating model. *Energy and Buildings*. 248
- [Robathan et al., 1989] Robathan, P., Ltd, I. T. S., y Britain), I. B. G. G. (1989). *Intelligent Buildings Guide*. IBC Technical Services Limited. 283
- [Rodríguez-Soria et al., 2012] Rodríguez-Soria, B., Pérez-Bella, J., Domínguez-Hernández, J., y del Coz-Díaz, J. (2012). calidad del aire interior y eficiencia energetica. *DYNA Ingeniería e Industria*, 87(1):74–79. 123
- [Rosenblatt, 1958] Rosenblatt, F. (1958). The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological review*, 65(6):386. 70
- [Ross, 2009] Ross, T. J. (2009). *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons. 56
- [Rumelhart et al., 1986] Rumelhart, D. E., Hintont, G. E., y Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323(6088):533–536. 72
- [Russell y Norvig, 2010] Russell, S. y Norvig, P. (2010). *Artificial intelligence: a modern approach*. Prentice hall. xviii, 35, 101
- [Rutishauser et al., 2005] Rutishauser, U., Joller, J., y Douglas, R. (2005). Control and learning of ambience by an intelligent building. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 35(1):121–132. xxii, 326, 327, 334, 337, 338, 341, 344, 357

## REFERENCIAS

---

- [Rydin y Austin, 2010] Rydin, Y. y Austin, P. (2010). *RICS Global Zero Carbon Capacity Index 2009 (incorporating results for ZC2 Index 2008)*. UCL Environment Institute. xviii, 119, 120
- [Saaty, 1996] Saaty, T. (1996). *Decision making with dependence and feedback: the analytic network process: the organization and prioritization of complexity*. RWS publications Pittsburgh, PA, US. 143
- [Salmerón et al., 2013] Salmerón, J., Álvarez, S., Molina, J., Ruiz, A., y Sánchez, F. (2013). Tightening the energy consumptions of buildings depending on their typology and on climate severity indexes. *Energy and Buildings*, 58(0):372 – 377. 238
- [Salmerón, 2011] Salmerón, R. (2011). *Tesis Doctoral: Procedimiento para el diseño de edificación de alta eficiencia energética para las tipologías arquitectónicas básicas*. Departamento de historia, teoría y composición arquitectónica. Universidad de Sevilla. 167
- [Schlueter y Thesseling, 2009] Schlueter, A. y Thesseling, F. (2009). Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages. *Automation in Construction*, 18(2):153–163. 148
- [Seaman, 1998] Seaman, G. (1998). What is open source hardware'? *Open Collector*. Disponible en web: [http://opencollector.org/Whyfree/open\\_hardware.html](http://opencollector.org/Whyfree/open_hardware.html). 371
- [Shahnawaz Ahmed et al., 2007] Shahnawaz Ahmed, S., Shah Majid, M., Novia, H., y Abd Rahman, H. (2007). Fuzzy logic based energy saving technique for a central air conditioning system. *Energy*, 32(7):1222–1234. 324, 325, 344, 357
- [Shepherd y Batty, 2003] Shepherd, A. y Batty, W. (2003). Fuzzy control strategies to provide cost and energy efficient high quality indoor environments in buildings with high occupant densities. *Building Services Engineering Research and Technology*, 24(1):35–45. 328, 344, 357
- [Sidwell, 1996] Sidwell, A. (1996). Australia's intelligent home. Construction Industry Insititute. 283

- [Sierra et al., 2005] Sierra, E., Hossian, A., García-Martínez, R., y Marino, P. (2005). Sistema experto para control inteligente de las variables ambientales de un edificio energéticamente eficiente. *Proceedings de la XI Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control. Universidad Nacional de Río Cuarto.*, 1:446–452. 344, 357, 392
- [Smith et al., 2011] Smith, A., Fumo, N., Luck, R., y Mago, P. J. (2011). Robustness of a methodology for estimating hourly energy consumption of buildings using monthly utility bills. *Energy and Buildings*, 43(4):779 – 786. 199
- [So y Chan, 1999] So, A. y Chan, W. (1999). *Intelligent building systems*, volume 5. Springer. 283
- [Soyguder, 2011] Soyguder, S. (2011). Intelligent system based on wavelet decomposition and neural network for predicting of fan speed for energy saving in hvac system. *Energy and Buildings*, 43(4):814–822. 304, 321
- [Soyguder y Alli, 2009a] Soyguder, S. y Alli, H. (2009a). An expert system for the humidity and temperature control in hvac systems using anfis and optimization with fuzzy modeling approach. *Energy and Buildings*, 41(8):814–822. xxi, xxii, 299, 304, 306, 307, 321, 344, 357
- [Soyguder y Alli, 2009b] Soyguder, S. y Alli, H. (2009b). Predicting of fan speed for energy saving in hvac system based on adaptive network based fuzzy inference system. *Expert Systems with Applications*, 36(4):8631–8638. 304, 321
- [Soyguder y Alli, 2010] Soyguder, S. y Alli, H. (2010). Fuzzy adaptive control for the actuators position control and modeling of an expert system. *Expert Systems with Applications*, 37(3):2072–2080. xxii, 304, 321, 322, 323, 344, 357
- [Soyguder et al., 2009] Soyguder, S., Karakose, M., y Alli, H. (2009). Design and simulation of self-tuning pid-type fuzzy adaptive control for an expert hvac system. *Expert Systems with Applications*, 36(3):4566–4573. 304, 321, 344
- [Sprague y Carlson, 1982] Sprague, R. y Carlson, E. (1982). *Building effective decision support systems*. Prentice Hall Professional Technical Reference. 41

## REFERENCIAS

---

- [Stamper et al., 2000] Stamper, R., Liu, K., Hafkamp, M., y Ades, Y. (2000). Understanding the roles of signs and norms in organizations-a semiotic approach to information systems design. *Behaviour & Information Technology*, 19(1):15–27. 336
- [Standard, 1992] Standard, A. (1992). 55, thermal environmental conditions for human occupancy. *American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers*, 145. 310, 311
- [Standard, 2002] Standard, I. (2002). 7726. *Thermal environments: Instruments and methods for measuring physical quantities*. Geneva: International Standard Organization. 385
- [Steeners y Manchanda, 2010] Steemers, K. y Manchanda, S. (2010). Energy efficient design and occupant well-being: Case studies in the uk and india. *Building and Environment*, 45(2):270–278. 288
- [Stumpf et al., 2009] Stumpf, A., Kim, H., y Jenicek, E. (2009). Early design energy analysis using bims (building information models). *Construction Research Congress: Building a Sustainable Future.*, pages 426–436. 122, 234
- [Szokolay, 2012] Szokolay, S. (2012). *Introduction to Architectural Science*. Routledge. 311
- [TAPR, 2007] TAPR (2007). The tapr open hardware license. Disponible en web: <http://www.tapr.org/OHL>. 371
- [Thorsson et al., 2007] Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I., y Holmer, B. (2007). Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology*, 27(14):1983–1993. 368
- [Tikuisis et al., 2001] Tikuisis, P., Meunier, P., y Jubenville, C. (2001). Human body surface area: measurement and prediction using three dimensional body scans. *European journal of applied physiology*, 85(3-4):264–271. 314

- [Tripathi, 2011] Tripathi, K. (2011). A review on knowledge-based expert system: Concept and architecture. *IJCA Special Issue on "Artificial Intelligence Techniques - Novel Approaches & Practical Applications"*, 1(1):19–23. 18
- [Tripolitakis et al., 2004] Tripolitakis, E., Kolokotsa, D., Kalaitzakis, K., y Stavrakakis, G. (2004). Study and implementation of a fuzzy pd thermal comfort controller for embedded fieldbus systems applications. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 3(9):2051–2057. 328, 344, 357
- [TRNSYS, 2013] TRNSYS (2013). Trnsys. Disponible en web: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>. 158
- [Turban, 1990] Turban, E. (1990). *Decision support and expert systems: management support systems*. Prentice Hall PTR. 40
- [Turban y Aronson, 2001a] Turban, E. y Aronson, J. (2001a). *Decision support systems and intelligentsystems*. Prentice International Hall, Hong Kong, 6 th edition. 31
- [Turban y Aronson, 2001b] Turban, E. y Aronson, J. (2001b). Expert systems and intelligent systems. 14, 42
- [Turskis et al., 2007] Turskis, Z., Ambrasas, G., Kalibatas, D., y Barvidas, A. (2007). Multiple criteria decision support system model for construction works technological cards designing. *Proc. of the 9th International Conference, Modern Building Materials, Structures and Techniques*, pages 381–391. xvii, 48
- [UE et al., 2010] UE, E. C. y others (2010). Directive 2010/31/eu of the european parliament and of the council of 19 may 2010 on the energy performance of buildings (recast). 120
- [UE y Council, 2002] UE, E. P. y Council (2002). Directive 2002/91/EC (EPBD) of 16 December 2002 on the Energy Performance of Buildings. directiva relativa a la eficiencia energética de los edificios. directiva 2002/91/ce del parlamento europeo y del consejo de 16 de diciembre de 2002. 120

## REFERENCIAS

---

- [UE, 2007] UE, U. E. (2007). Limitar el calentamiento mundial a 2 °C - Medidas necesarias hasta 2020 y después. Comunicación de la Comisión, de 10 de enero de 2007. 120
- [van Aart, 2005] van Aart, C. (2005). *Organizational principles for multi-agent architectures*. Birkhäuser. xviii, 107, 108
- [Van Hoof, 2008] Van Hoof, J. (2008). Forty years of fanger's model of thermal comfort: comfort for all? *Indoor Air*, 18(3):182–201. 292, 392, 414
- [Vernon, 1932] Vernon, H. (1932). The measurement of radiant heat in relation to human comfort. *Journal of Industrial Hygiene*, pages 95–111. 369
- [Von Wright, 1963] Von Wright, G. (1963). *Norm and action: a logical enquiry*. Routledge & Kegan Paul. 336
- [Wagner et al., 2012] Wagner, C., Goumopoulos, C., y Hagraas, H. (2012). Emerging and adaptive fuzzy logic based behaviours in activity sphere centred ambient ecologies. *Pervasive and Mobile Computing (Special Issue on Ambient Ecologies)*, 8(4):500 – 521. 339, 341, 344, 357
- [Wang y Jin, 2000] Wang, S. y Jin, X. (2000). Model-based optimal control of vav air-conditioning system using genetic algorithm. *Building and Environment*, 35(6):471–487. 333, 344, 357
- [Wang y Xu, 2002] Wang, S. y Xu, X. (2002). A robust control strategy for combining dcv control with economizer control. *Energy conversion and management*, 43(18):2569–2588. 344, 357
- [Wang y Xu, 2004] Wang, S. y Xu, X. (2004). Optimal and robust control of outdoor ventilation airflow rate for improving energy efficiency and iaq. *Building and Environment*, 39(7):763–773. 344, 357
- [Wang et al., 1992] Wang, Y., Moss, J., y Thisted, R. (1992). Predictors of body surface area. *Journal of clinical anesthesia*, 4(1):4–10. 313



- [Wang et al., 2012] Wang, Z., Wang, L., Dounis, A. I., y Yang, R. (2012). Multi-agent control system with information fusion based comfort model for smart buildings. *Applied Energy*, 99(0):247 – 254. xxii, 339, 340, 341, 344, 357
- [Weiss, 1999] Weiss, G. (1999). *Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence*. The MIT press. 35
- [Wiig, 1994] Wiig, K. (1994). *Knowledge management, the central management focus for intelligent-acting organization*. Arlington: Schema Press. 29
- [Wilde y Voorden, 2004] Wilde, P. y Voorden, M. (2004). Providing computational support for the selection of energy saving building components. *Energy and Buildings*, 36(8):749–758. 122
- [Wirtz, 2001] Wirtz, K. W. (2001). Strategies for transforming fine scale knowledge to management usability. *Marine Pollution Bulletin*, 43(7-12):209 – 214. Marine Environmental Modelling. 35
- [Wooldridge, 1997] Wooldridge, M. (1997). Agent-based software engineering. *Software Engineering. IEE Proceedings*, 144(1):26–37. 101
- [Wooldridge y Jennings, 1995] Wooldridge, M. y Jennings, N. (1995). Intelligent agents: Theory and practice. *Knowledge engineering review*, 10(2):115–152. 100
- [Wright et al., 2002] Wright, J., Loosemore, H., y Farmani, R. (2002). Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 34(9):959–972. 333, 344, 357
- [Xively, 2013] Xively (2013). The internet of things is open for business. Disponible en web: <https://xively.com/>. 373
- [Yalcintas y Akkurt, 2005] Yalcintas, M. y Akkurt, S. (2005). Artificial neural networks applications in building energy predictions and a case study for tropical climates. *International journal of energy research*, 29(10):891–901. 331, 344, 357

## REFERENCIAS

---

- [Yamada et al., 1999] Yamada, F., Yonezawa, K., Sugawara, S., y Nishimura, N. (1999). Development of air-conditioning control algorithm for building energy saving. *Control Applications, 1999. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on*, 2:1579–1584. 328, 344, 357
- [Yang et al., 2003a] Yang, I., Yeo, M., y Kim, K. (2003a). Application of artificial neural network to predict the optimal start time for heating system in building. *Energy Conversion and Management*, 44(17):2791–2809. 329
- [Yang y Wang, 2012] Yang, R. y Wang, L. (2012). Multi-objective optimization for decision-making of energy and comfort management in building automation and control. *Sustainable Cities and Society*, 2(1):1 – 7. 339, 341, 344, 357
- [Yang et al., 2003b] Yang, Y., Wang, S., Dulaimi, M., y Low, S. (2003b). A fuzzy quality function deployment system for buildable design decision-makings. *Automation in construction*, 12(4):381–393. xix, 149, 150, 151
- [York y Tucker, 1980] York, D. y Tucker, E. (1980). Doe-2 reference manual. Informe técnico, Los Alamos Scientific Lab., NM (USA); California Univ., Berkeley (USA). Lawrence Berkeley Lab. 156
- [Yu et al., 2010] Yu, C.-Y., Lin, C.-H., y Yang, Y.-H. (2010). Human body surface area database and estimation formula. *Burns*, 36(5):616–629. 314
- [Zacagnini y Adarraga, 1988] Zacagnini, J. y Adarraga, P. (1988). Sistemas expertos y psicología cognitiva. *Estudios de psicología*, 1(36):97–130. 12
- [Zadeh, 1965] Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3):338–353. 54

# **Lista de siglas y acrónimos**

## **Lista de siglas y acrónimos**

---

**ACL** Agent communication language

**ACO** Ant colony optimization - Optimización basada en colonias de hormigas

**ACS** Agua Caliente Sanitaria

**AIE** Agencia internacional de la energía

**AMS** Adaptive multi-start - Multi-arranque adaptativo

**AOSE** Agent-oriented software engineering - Software de ingeniería orientada a agentes

**AHP** Analytic Hierarchy Process - Proceso de Jerarquía Analítica

**AT** Asynchronous teams - Equipos asíncronos

**BDI** Beliefs, desires and intentions - Creencias, deseos, intenciones

**BEEPS** Building Energy and Environment Performance System

**BIM** Building Information Modeling - Modelado de información de construcción

**BSA** Body surface area - Área de superficie corporal

**CA** Cultural algorithms - Algoritmos culturales

**CCV** Coste del ciclo de vida

**CE** Comisión Europea

**CEE** Calificación de eficiencia energética

**CES** Sistemas de aumento de la creatividad

**COA** Centre of areas - Centro de áreas

**COG** Centre of gravity - Centro de gravedad

**COGS** Centre of gravity singletons - Centro de gravedad para singletons

**CNP** Contract net protocol

---

**CTE** Código técnico de la edificación

**DBMS** Database management system - Sistemas de gestión de bases de datos

**DC** Demanda de Calefacción

**DR** Demanda de Refrigeración

**DSS** Decision Support System - Sistemas de ayuda a la toma de decisiones

**ECO** Energy conservation opportunities - Oportunidades de conservación de energía

**EDA** Estimation distribution algorithms - Algoritmos de estimación de la distribución

**EF** Energía final

**EIS** Sistema de información ejecutiva

**EP** Energía primaria

**EPC** Energy Performance Certificates

**ESS** Sistema de ayuda ejecutivo

**FANS** Fuzzy adaptive neighborhood search - Búsqueda de vecindad adaptativa difusa

**GA** Genetic algorithms - Algoritmos genéticos

**GDSS** grupo de ayuda a las decisiones del sistema

**GLS** Guided local search - Búsqueda local guiada

**GRASP** Greedy randomize adaptive search procedures - Procedimientos de búsqueda codiciosos, aleatorios y adaptativos

**HC** Heuristic concentration - Concentración heurística

**HVAC** Heating, ventilation, and air conditioning - Calefacción, ventilación y aire acondicionado

## **Lista de siglas y acrónimos**

---

**IA** Inteligencia artificial

**IDSS** Sistema inteligente de ayuda a la toma de decisiones

**IEE** Índice de eficiencia energética

**IEEE** Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

**IEQF** Indoor environmental quality factor - Factor de calidad ambiental en el interior

**ILS** Iterated local search - Búsqueda local iterative

**KBS** Sistemas basados en el conocimiento

**KQML** Knowledge query manipulation language

**LM** Left maximum - Máximo por la izquierda

**MA** Memetic algorithms - Algoritmos meméticos

**MAS** Multi-agent systems - Sistemas Multi-Agentes

**MLS** Sistemas de aprendizaje automatizado

**MSM** Multi-start methods - Métodos multi-arranque

**NM** Noising methods - Métodos ruidosos

**OO** Orientados a objetos

**OWA** Ordered weighted averaging - Media ponderada ordenada

**OWL** Web ontology language

**PID** Proporcional, integral y derivativo

**PLC** Programmable logic control - Control lógico programable

**PMV** Predicted mean vote - Voto medio estimado o previsto

**PPD** Predicted percent of dissatisfied - Porcentaje de personas insatisfechas

---

**PR** Path relinking

**RITE** Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios

**RM** Right maximun - Máximo por la derecha

**RNA** Red neuronal artificial

**RNN** Recurrent Neural Network - Red neuronal recurrente

**SA** Simulated annealing - Recocido simulado

**SBC** Sistemas basados en el conocimiento

**SCI** Severidad climática de invierno

**SCV** Severidad climática de verano

**SE** Sistema experto

**SGBD** Sistemas de gestión de bases de datos

**SGBM** Sistema de gestión de la base de modelos

**SGGD** Sistema de generación y gestión del diálogo

**SI** Sistemas inteligentes

**SI** Swarm intelligence - Inteligencia de enjambre

**SIG** Sistemas de información geográfica

**SMS** Sistema de ayuda a la gestión

**SS** Scatter Search - Búsqueda dispersa

**TAM** Threshold accepting methods - Método de aceptación del umbral

**THTG** Temperatura Húmeda-Temperatura de Globo

**TIR** Tasa Interna de Retorno

**TS** Tabú Search - Búsqueda Tabú

## **Lista de siglas y acrónimos**

---

**UE** Unión Europea

**UNE** Una norma español

**VAN** Valor actual neto

**VNS** Variable neighborhood search - Búsqueda de vecindad variable

**WBGT** Wet bulb globe temperature - Índice de temperatura de globo con bulbo húmedo

**WCI** Wind chill index - Índice de sensación térmica del viento

**WDSS** Sistema de ayuda a la decisión total

**WSN** Wireless sensor networks - Red de sensores inalámbricos





# Herramienta informática interfaz de usuario

Este anexo recoge una breve explicación del funcionamiento de la aplicación. Su contenido, en esta primera revisión de la herramienta es bastante escueto, debido a que, dicha revisión es una versión en desarrollo, no válida aun para producción y que por tanto carece de muchas de las funcionalidades que se pretende estén disponibles en próximas revisiones. Las anotaciones acerca de las funcionalidades de la aplicación vienen acompañadas de capturas de pantalla para hacer más intuitivo el seguimiento.

## A.1 Previo al inicio

El usuario se descarga el programa LIDER. LIDER es la aplicación informática que permite cumplir con la opción general de verificación de la exigencia de Limitación de Demanda Energética establecida en el Documento Básico de la Habitabilidad y Energía del Código Técnico de la Edificación (CTE-HE1) y está patrocinada por el Ministerio de Vivienda y por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA). Esta aplicación se puede descargar desde la url (figura A.1): <http://www.codigotecnico.org/web/recursos/aplicaciones/>

## A. HERRAMIENTA INFORMÁTICA INTERFAZ DE USUARIO



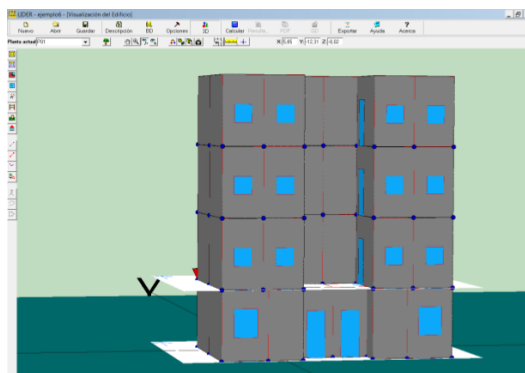
**Figura A.1:** Página web: [www.codigotecnico.org](http://www.codigotecnico.org)

El usuario diseña el edificio en el programa líder, véase el Anexo B. El usuario abre el programa LIDER, figura A.2.



**Figura A.2:** Programas - LIDER.

Mediante la aplicación de esta herramienta, el usuario diseña el edificio (figura A.3), realiza la descripción geométrica, constructiva y operacional de éste, así como los cálculos recogidos en el CTE-HE1 que permiten la impresión de la documentación administrativa pertinente.

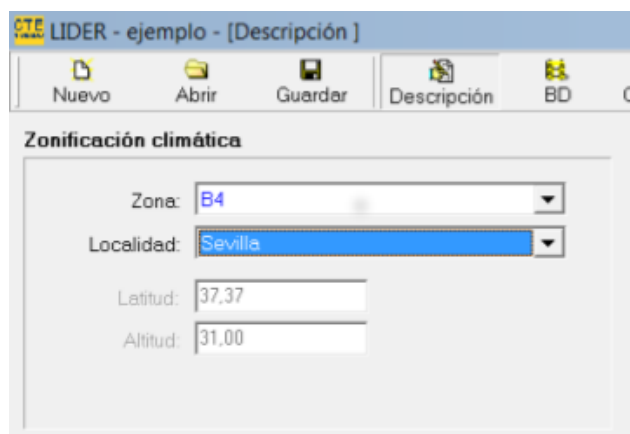


**Figura A.3:** Edificio diseñado en el programa LIDER.

LIDER permite definir inmuebles de cualquier tamaño, siempre que su número

de espacios no supere los 100 y que su elementos (cerramientos, incluyendo los interiores y las ventanas) no sean más de 500. Si se sobrepasan estos límites, es posible dividir el edificio en tantas partes como sea necesario sólo para verificar las exigencias del CTE-HE1 y se considerará que, si todas las partes cumplen, el conjunto también cumple.

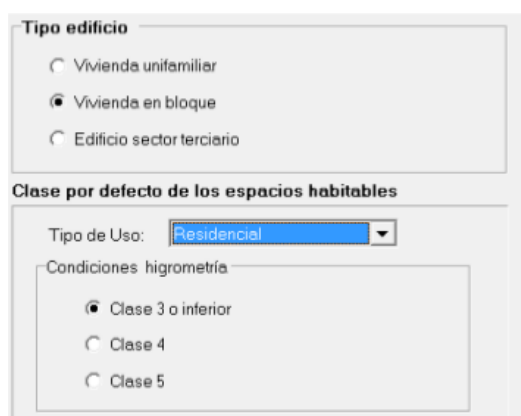
El usuario deberá seleccionar la misma zona climática en el LIDER que en la aplicación SEDICAE, esta debe ser indicada en el apartado descripción del LIDER, figura A.4.



The screenshot shows a software window titled "CTE LIDER - ejemplo - [Descripción]". It has a menu bar with "Nuevo", "Abrir", "Guardar", "Descripción", and "BD". Below the menu bar is a section titled "Zonificación climática". This section contains four input fields: "Zona:" with a dropdown menu showing "B4", "Localidad:" with a dropdown menu showing "Sevilla", "Latitud:" with a text box containing "37.37", and "Altitud:" with a text box containing "31.00".

**Figura A.4:** Descripción programa LIDER.

En este mismo apartado, se debe seleccionar el tipo de edificio. Para esta versión de SEDICAE el edificio diseñado deberá ser residencial, figura A.5.



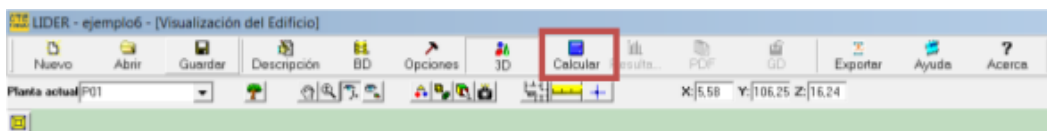
The screenshot shows a software window titled "Tipo edificio". It contains two sections. The first section, "Tipo edificio", has three radio button options: "Vivienda unifamiliar", "Vivienda en bloque" (which is selected), and "Edificio sector terciario". The second section, "Clase por defecto de los espacios habitables", has a "Tipo de Uso:" dropdown menu showing "Residencial". Below this is a section titled "Condiciones higrometría" with three radio button options: "Clase 3 o inferior" (which is selected), "Clase 4", and "Clase 5".

**Figura A.5:** Tipología de edificio en programa LIDER.

## A. HERRAMIENTA INFORMÁTICA INTERFAZ DE USUARIO

---

Una vez completado el edificio, el usuario calculará el edificio, figuras A.6 y A.7.

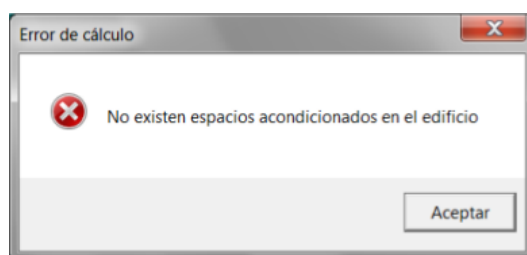


**Figura A.6:** Sección calcular en el programa LIDER.



**Figura A.7:** Calculando edificio en el programa LIDER.

Si el edificio se ha calculado correctamente, y no existen errores, por ejemplo el error de la figura A.8.

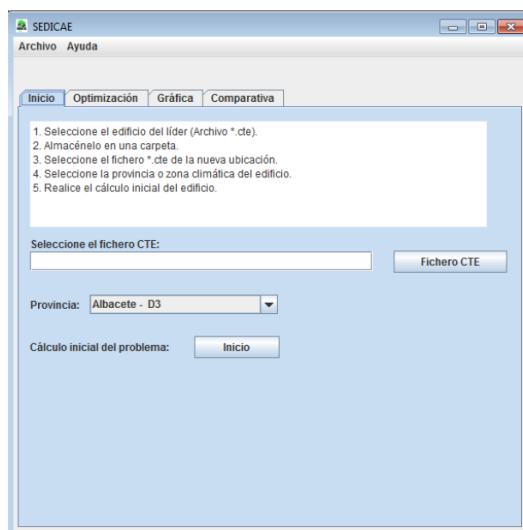


**Figura A.8:** Ejemplo de error de cálculo en el programa LIDER.

Se habrá generado correctamente un archivo newbdl.inp en la carpeta de resultados del LIDER. Éste archivo, deberá ser almacenado en una nueva carpeta, por ejemplo “Ejemplo3”. Seguidamente, deberá cambiarle el nombre a extensión “\*.cte”, por ejemplo: ‘ejemplo3.cte’

## A.2 Aplicación

Después de diseñar el edificio y archivarlo en una carpeta, el usuario lanza la aplicación SEDICAE, figura A.9.



**Figura A.9:** Interfaz programa SEDICAE.

Al inicio de la ejecución de la aplicación, el usuario se encuentra frente a una interfaz gráfica que se divide en los siguientes apartados o capas:

1. Inicio: En este apartado se realiza el cálculo de la situación de partida con el cual el programa SEDICAE debe encontrar la configuración óptima para el edificio diseñado por el usuario.
2. Optimización: Se le pide al usuario el criterio de optimización requerido para el edificio diseñado.
3. Gráfica: Se muestra una gráfica de la evolución del algoritmo en la búsqueda del resultado óptimo.
4. Comparativa: Se muestra al usuario, un informe comparativo de la situación inicial y final del edificio. Junto con estos apartados, el sistema muestra también una barra de herramientas, compuesta de dos apartados. Archivo, donde se encuentra el cierre o salida del sistema, y ayuda, donde se encuentra un espacio para la configuración del sistema.

## A. HERRAMIENTA INFORMÁTICA INTERFAZ DE USUARIO

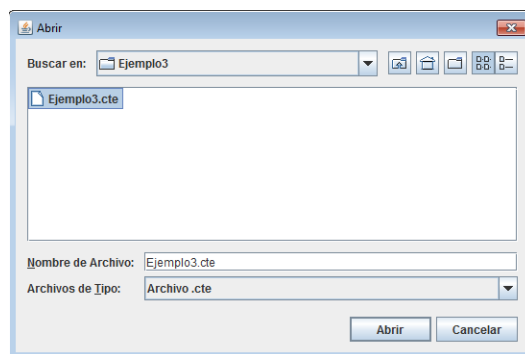
---

### A.3 Generación de la situación inicial de partida

En la primera fase, el usuario debe generar la situación de partida para la optimización del edificio. Para este propósito, el usuario debe de realizar los pasos previos que le son recordados en la parte superior del panel de inicio.

En primer lugar, el usuario deberá seleccionar el fichero “\*.cte” correspondiente al edificio de estudio.

El usuario selecciona el archivo “\*.cte” almacenado en la carpeta “Ejemplo3” nombrado como “ejemplo3.cte”, figura A.10.



**Figura A.10:** Importar fichero de diseño al programa SEDICAE.

Seguidamente, el usuario debe indicar las capitales de provincia o zona climática correspondiente a la ubicación en la cual se pretende situar el edificio en estudio.

El programa contempla las siguientes zonas climáticas: A3, A4, B3, B4, C1, C2, C3, C4, D1, D2, D3, E1

Tras la selección de la zona climática, el usuario pulsa el botón de ‘Inicio’.

El sistema calcula la situación de partida ejecutando el motor de cálculo del LIDER, figura A.11.

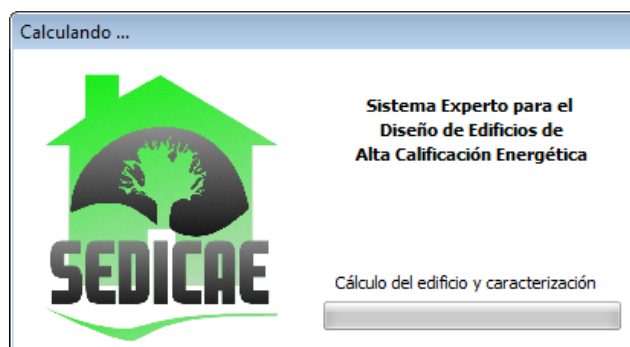
El sistema lanza una aplicación que tras calcular el edificio, obtiene los parámetros de partida característicos del edificio de partida que son necesarios para la aplicación de la heurística aplicada.

Una vez finalizado se crean los archivos necesarios para la optimización y se lanza el mensaje “Se ha generado correctamente el edificio de partida”, figura A.12.

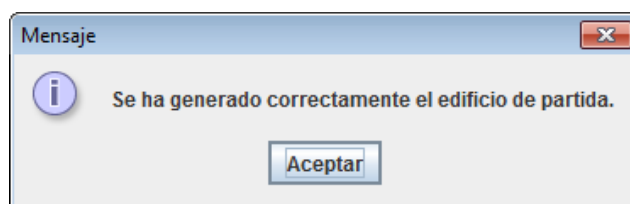
Si existe algún problema con el edificio introducido, aparecerán mensajes de error, como el de la figura A.13, indicando la naturaleza del problema.

### A.3 Generación de la situación inicial de partida

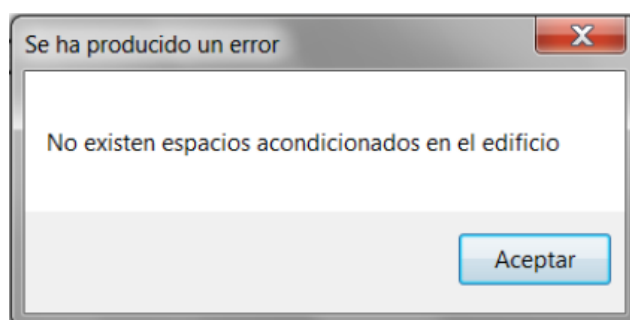
---



**Figura A.11:** Motor de cálculo de LIDER en SEDICAE, edificio de partida.



**Figura A.12:** Mensaje.

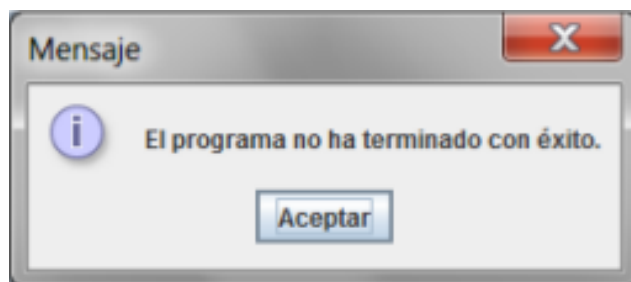


**Figura A.13:** Mensaje.

## A. HERRAMIENTA INFORMÁTICA INTERFAZ DE USUARIO

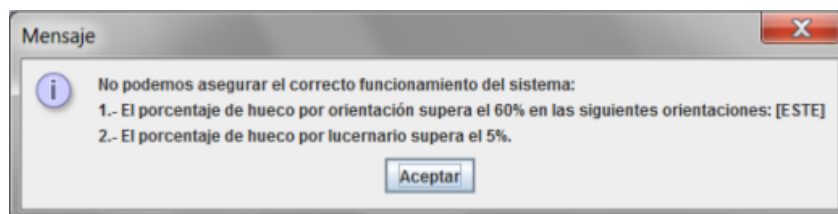
---

Si no se generan los archivos necesarios en este proceso inicial se indicará con un mensaje “El programa no ha terminado con éxito”, figura A.14.



**Figura A.14:** Mensaje.

El caso de estudio que se realice, debe corresponder a una vivienda, con un porcentaje de lucernarios inferior al 5 % y de huecos inferior al 60 % en todas las fachadas u orientaciones. En caso contrario, el sistema se puede aplicar, pero no se puede asegurar el correcto funcionamiento de la solución obtenida. La aplicación desarrollada avisará mediante un mensaje de aquella situación que provoque que el sistema no pueda asegurar el correcto funcionamiento (figura A.15):



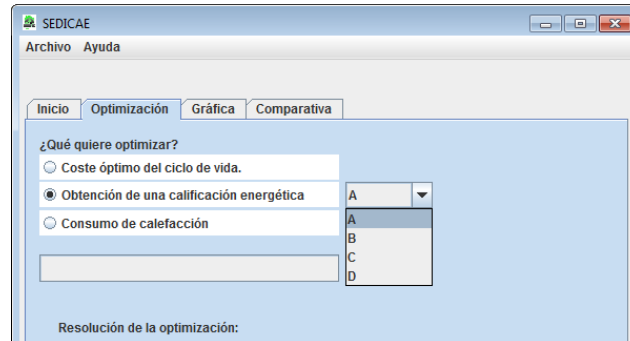
**Figura A.15:** Mensaje.

1. El porcentaje de hueco por orientación supera el 60 % en las siguientes orientaciones [...].
2. No se puede asegurar el correcto funcionamiento del sistema. El porcentaje de hueco por lucernario supera el 5 %.

Tras el cálculo del edificio de partida, el usuario debe seleccionar el criterio de optimización necesario para su proyecto, entre las siguientes posibilidades (figura A.16):



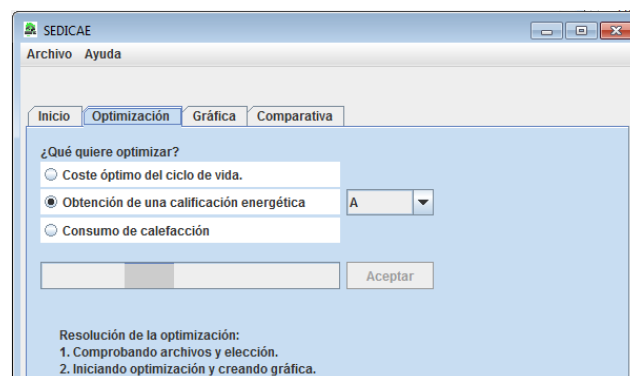
### A.3 Generación de la situación inicial de partida



**Figura A.16:** Seleccionar criterio de optimización.

1. Coste óptimo del ciclo de vida: El sistema optimiza el edificio para que tenga el menor coste del ciclo de vida.
2. Obtención de una calificación energética: El sistema optimiza el edificio para que tenga el menor coste del ciclo de vida posible con la calificación energética indicada por el usuario.
3. Consumo de calefacción: El sistema optimiza el edificio en base al consumo de calefacción de éste.

Una vez seleccionada la opción elegida por el usuario, éste presiona el botón de 'Aceptar'. El sistema inicia el cálculo del algoritmo de optimización en base al criterio elegido (figura A.17).



**Figura A.17:** Inicio algoritmo.

## A. HERRAMIENTA INFORMÁTICA INTERFAZ DE USUARIO

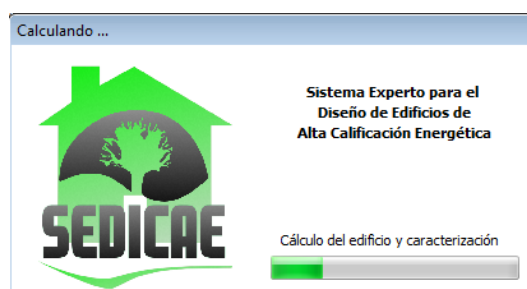
---

Tras generar la solución óptima, el sistema obtiene los parámetros característicos y genera el edificio óptimo. Tras esto, se genera un archivo del tipo: “ejemplo3\_optimo.cte”.

El sistema calcula la situación óptima ejecutando el motor de cálculo del LIDER, figuras A.18 y A.19.

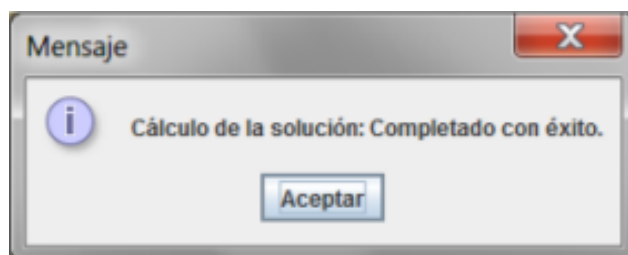


**Figura A.18:** Escritura edificio óptimo en fichero “\*.cte”.



**Figura A.19:** Cálculo del edificio y caracterización.

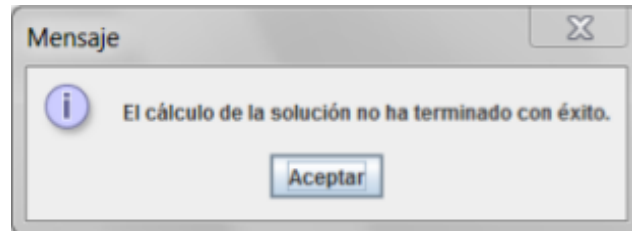
Al finalizar, se lanza un mensaje de “Cálculo de la solución: Completado con éxito”, figura A.20.



**Figura A.20:** Mensaje.

### A.3 Generación de la situación inicial de partida

En caso contrario, se lanza un mensaje: “El cálculo de la solución no ha terminado con éxito”, figura A.21.



**Figura A.21:** Mensaje.

Finalizado el proceso, el sistema genera una gráfica (figura A.22), que representa el proceso de optimización, en ésta se destacan los puntos más importantes del proceso de optimización.

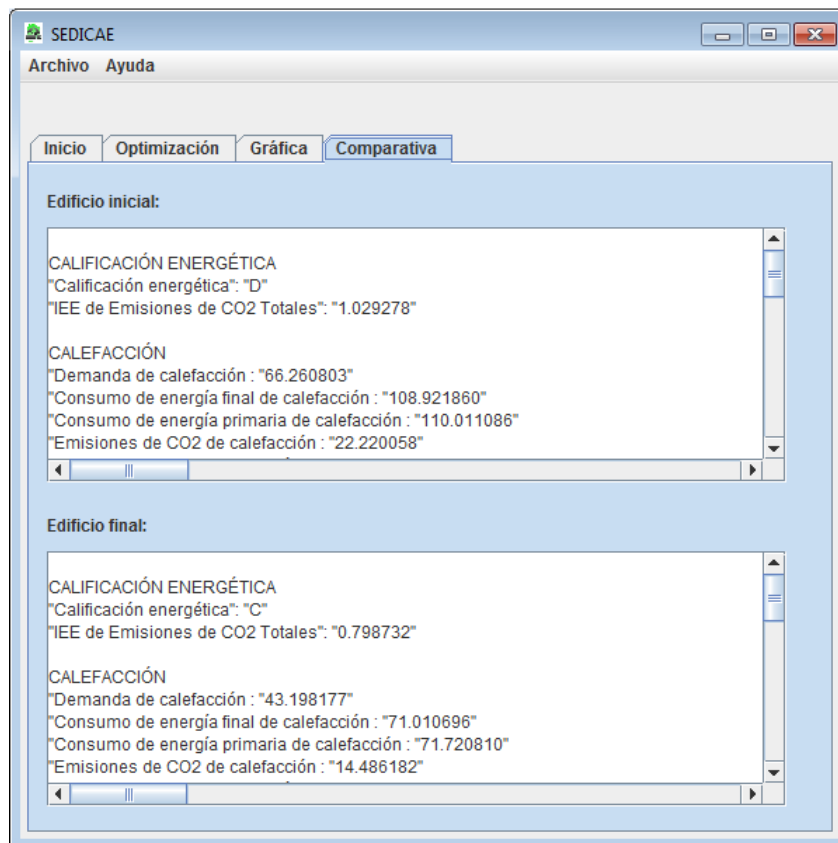


**Figura A.22:** Gráfico.

## A. HERRAMIENTA INFORMÁTICA INTERFAZ DE USUARIO

---

Por último, se muestra al usuario, un informe comparativo de la situación inicial y final del edificio, figura A.23.



**Figura A.23:** Comparativa.

En una versión posterior, el sistema se amplió, presentando una interfaz gráfica parecida, figura A.24.

Entre las novedades, el sistema permite seleccionar diferentes rangos de área de ventana, en cada orientación, figura A.25.

En las siguientes figuras se presenta la gráfica, y una mejora en la representación de las comparativas, figura A.26 y A.27.

Además, en esta nueva versión, el cálculo del edificio final (mejorado), su coste del ciclo de vida y su calificación energética es estudiada para diferentes sistemas de climatización y diferentes fuentes de energía, figura A.28.

### A.3 Generación de la situación inicial de partida

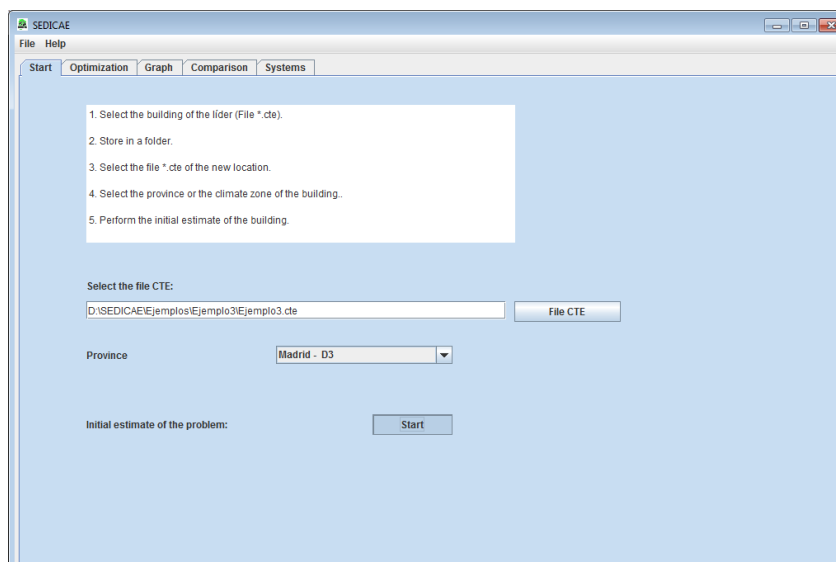


Figura A.24: Versión II.

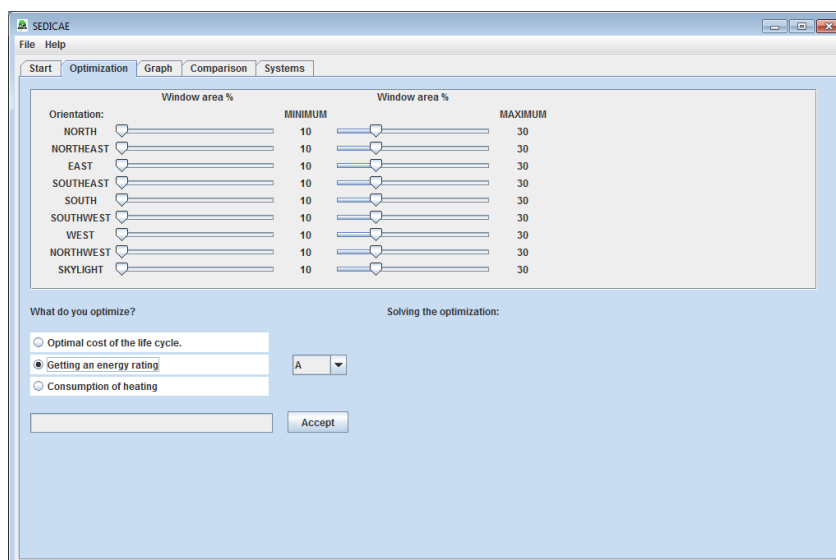


Figura A.25: Criterio de optimización.

# A. HERRAMIENTA INFORMÁTICA INTERFAZ DE USUARIO

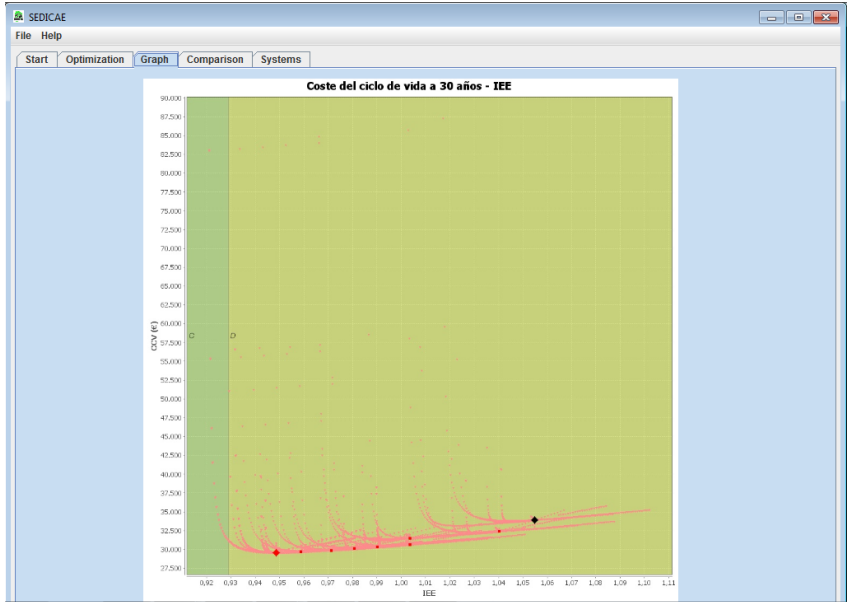
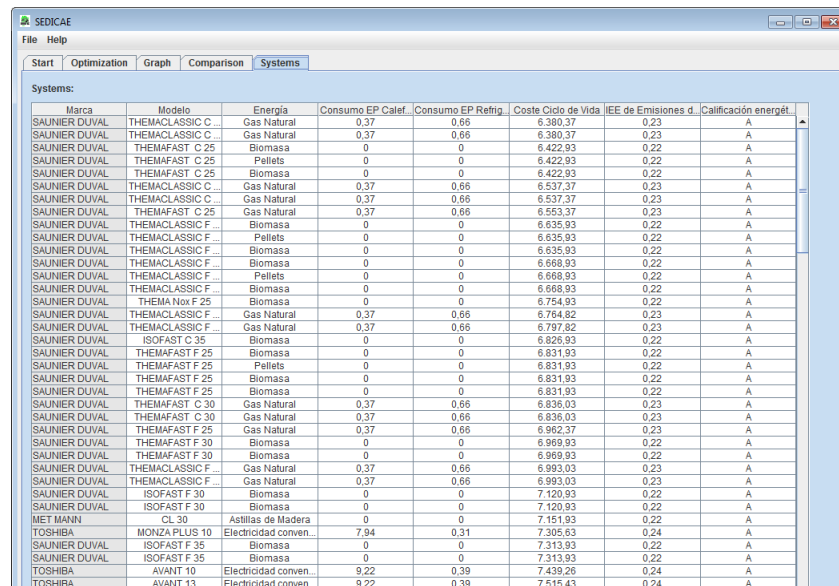


Figura A.26: Gráfico.

Qualification:			
Tipo		Inicial	Final
Calificación energética		D	C
IEE de Emisiones de CO2 Totales		1,04	0,74
Heating:			
Tipo		Inicial	Final
Demanda de calefacción (kWh/m2)		51	33,92
Consumo de energía final de calefacción (kWh/m2)		83,83	55,75
Consumo de energía primaria de calefacción (kWh/m2)		84,57	56,31
Emisiones de CO2 de calefacción (kg/m2)		17,1	11,37
IEE de Demanda de calefacción		1,18	0,78
IEE de Emisiones de CO2 de calefacción		1,23	0,82
Refrigeration:			
Tipo		Inicial	Final
Demanda de refrigeración (kWh/m2)		4,13	1,28
Consumo de energía final de refrigeración (kWh/m2)		2,1	0,65
Consumo de energía primaria de refrigeración (kWh/m2)		5,49	1,7
Emisiones de CO2 de refrigeración (kg/m2)		1,36	0,42
IEE de Demanda de refrigeración		0,34	0,11
IEE de Emisiones de CO2 de refrigeración		0,32	0,1
Anticipated costs:			
Tipo		Inicial	Final
Estimación del coste del Ciclo de Vida €		33.902,3	29.550,02
Inversión Total €		5.924,94	4.989,46
Coste del Sistema €		0	0
Coste de Inversión €/m²		44,22	37,23
Precio Total €		5.924,94	4.989,46
Coste de inversión de los Muros €		537,64	1.382,97
Coste de inversión de las Ventanas €		3.103,68	1.675,2
Coste de inversión de las Cubiertas €		530,73	782,25
Coste de inversión de los Suelos €		888,63	1.149,04
Coste de inversión de los Puentes Térmicos €		864,26	0
Situation:			
Tipo		Inicial	Final
U de la Cubierta		0,29	0,18
U del Suelo		0,36	0,28
U de los muros		NORTE 1.1 NORESTE 0.0 ESTE 1.1 SURESTE 0.0 SU...	NORTE 0.23 NORESTE 0.0 ESTE 0.23 SURESTE 0.0 S...
Ventanas		<NORTE <id 1 nombre:VER_ML_331 u 5.6 g 0.85 p 50...	<NORTE <id 1 nombre:VER_ML_331 u 5.6 g 0.85 p 50...
Puentes Térmicos		OpcionTTL <id 2.0 opcion:2.0 tipo:<ESQUINA_CONCAV...	OpacionTTL <id 1.0 opcion:1.0 tipo:<ESQUINA_CONCAV...

Figura A.27: Comparativa.

## A.3 Generación de la situación inicial de partida



The screenshot shows the SEDICAE software interface with the 'Systems' tab selected. The table lists various energy systems with their characteristics and performance metrics.

Marca	Modelo	Energía	Consumo EP Calef.	Consumo EP Refrig.	Coste Ciclo de Vida	IEE de Emisiones d.	Calificación energét.
SAUNIER DUVAL	THEMACLASSIC C	Gas Natural	0,37	0,66	6.380,37	0,23	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLASSIC C	Gas Natural	0,37	0,66	6.380,37	0,23	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST C 25	Biomasa	0	0	6.422,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST C 25	Pellets	0	0	6.422,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST C 25	Biomasa	0	0	6.422,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLASSIC C	Gas Natural	0,37	0,66	6.537,37	0,23	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLASSIC C	Gas Natural	0,37	0,66	6.537,37	0,23	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST C 25	Gas Natural	0,37	0,66	6.553,37	0,23	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLASSIC F	Biomasa	0	0	6.635,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLASSIC F	Pellets	0	0	6.635,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLASSIC F	Biomasa	0	0	6.635,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLASSIC F	Biomasa	0	0	6.668,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLASSIC F	Pellets	0	0	6.668,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLASSIC F	Biomasa	0	0	6.668,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMA Nox F 25	Biomasa	0	0	6.754,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLASSIC F	Gas Natural	0,37	0,66	6.764,82	0,23	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLASSIC F	Gas Natural	0,37	0,66	6.797,82	0,23	A
SAUNIER DUVAL	ISOFAST C 35	Biomasa	0	0	6.826,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST F 25	Biomasa	0	0	6.831,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST F 25	Pellets	0	0	6.831,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST F 25	Biomasa	0	0	6.831,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST F 25	Biomasa	0	0	6.831,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST C 30	Gas Natural	0,37	0,66	6.836,03	0,23	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST C 30	Gas Natural	0,37	0,66	6.836,03	0,23	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST F 25	Gas Natural	0,37	0,66	6.962,37	0,23	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST F 30	Biomasa	0	0	6.969,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST F 30	Biomasa	0	0	6.969,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLASSIC F	Gas Natural	0,37	0,66	6.993,03	0,23	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLASSIC F	Gas Natural	0,37	0,66	6.993,03	0,23	A
SAUNIER DUVAL	ISOFAST F 30	Biomasa	0	0	7.120,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	ISOFAST F 30	Biomasa	0	0	7.120,93	0,22	A
MET MANN	CL 30	Astillas de Madera	0	0	7.151,93	0,22	A
TOSHIBA	MONZA PLUS 10	Electricidad conven.	7,94	0,31	7.305,63	0,24	A
SAUNIER DUVAL	ISOFAST F 35	Biomasa	0	0	7.313,93	0,22	A
SAUNIER DUVAL	ISOFAST F 35	Biomasa	0	0	7.313,93	0,22	A
TOSHIBA	AVANT 10	Electricidad conven.	9,22	0,39	7.439,26	0,24	A
TOSHIBA	AVANT 13	Electricidad conven.	9,22	0,39	7.515,43	0,24	A

Figura A.28: Sistemas.

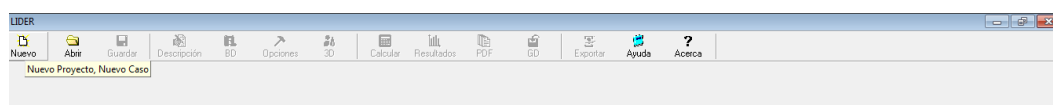




## Resumen básico de la aplicación LIDER

A continuación se presenta una breve explicación de la funcionalidad y procedimiento de uso de la aplicación LIDER.

En primer lugar, una vez instalado el programa LIDER, se podrán desarrollar y guardar diferentes proyectos. Para desarrollar un proyecto, se creará un “Nuevo” proyecto, en la pestaña correspondiente, figura B.1.



**Figura B.1:** Nuevo proyecto.

Previo al desarrollo del edificio, se describen algunas de las características, en la pestaña “Descripción”, véase figura B.2. En este espacio, se deben indicar las características de la zona climática del edificio, mediante la localidad y los parámetros de latitud y altitud. Junto a estos datos, se debe indicar la orientación de éste. Seguidamente se expresa la tipología del edificio y su uso, junto con las condiciones higrométricas, las renovaciones-hora requeridas y por último algunos datos del proyecto y su autor.

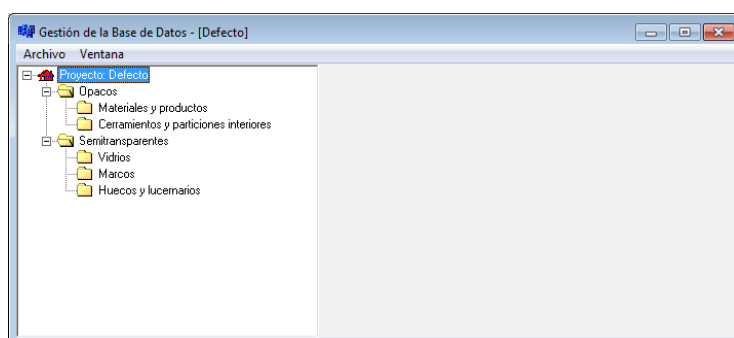
## B. RESUMEN BÁSICO DE LA APLICACIÓN LIDER

The screenshot shows the 'LIDER - Defecto' application window. The title bar reads 'LIDER - Defecto - [Descripción]'. The menu bar includes: Nuevo, Abrir, Guardar, Descripción, BD, Opciones, 3D, Calcular, Resultados, PDF, GD, Exportar, Ayuda, and Acerca. The main area is divided into several sections:

- Zonificación climática:** Zona (dropdown menu), Localidad (dropdown menu), Latitud (text input), and Altitud (text input).
- Orientación del edificio:** Ángulo (text input) and a diagram showing a building footprint with axes X, Y, and Z.
- Tipo edificio:** Radio buttons for 'Vivienda unifamiliar', 'Vivienda en bloque', and 'Edificio sector terciario'.
- Clase por defecto de los espacios habitables:** Tipo de Uso (dropdown menu) and Condiciones higrométrica (radio buttons for 'Clase 3 o inferior', 'Clase 4', and 'Clase 5').
- Datos del Proyecto:** Nombre del proyecto, Comunidad, Localidad, and Dirección (all text inputs).
- Datos del Autor:** Nombre, Empresa o Institución, E-mail, and Teléfono (all text inputs).
- Número de renovaciones hora requerido:** A text input field.
- Botón:** 'Aceptar' at the bottom right.

**Figura B.2:** Descripción.

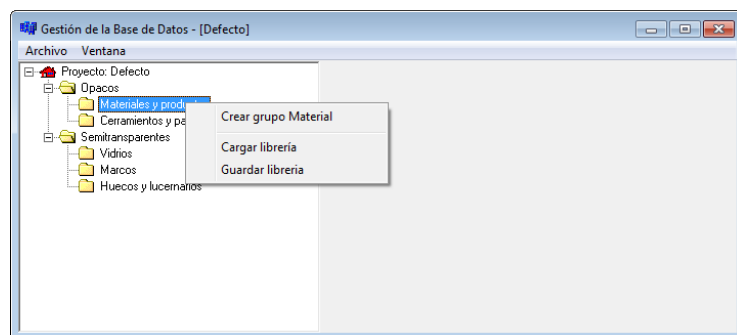
El siguiente apartado a desarrollar es la base de datos (BD), mediante la incorporación de elementos constructivos a la BD. Los elementos constructivos para la envolvente del edificio, se pueden definir o importar de otros proyectos. Por lo que se pueden emplear materiales de la librería de LIDER. Al inicio de un proyecto, las carpetas de materiales, vidrios y marcos se encuentran vacías (figura B.3).



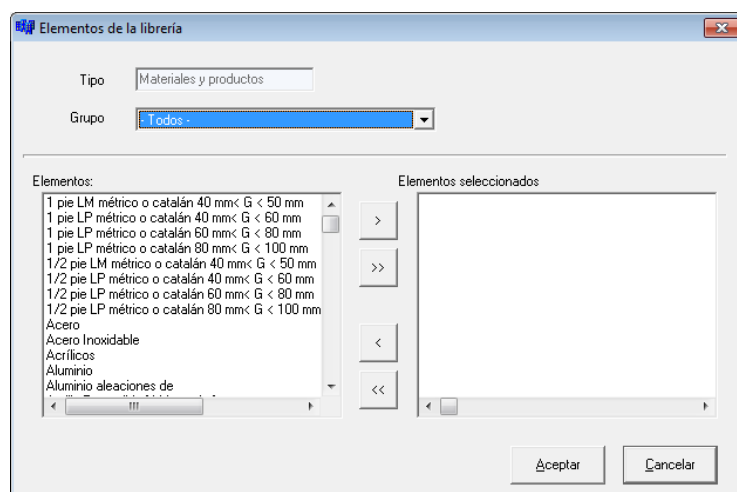
**Figura B.3:** Gestor de la base de datos.

En caso de desear cargar los materiales que se van a emplear en la construcción de la edificación, se debe pulsar el botón derecho del ratón sobre las carpetas y seleccionar "Cargar librería" (figura B.4). En dicho caso, se cargan los elemen-

tos de la librería de materiales y se seleccionan aquellos que se emplearán en la construcción del edificio (figura B.5).



**Figura B.4:** Opciones para añadir elementos a la base de datos.



**Figura B.5:** Pantalla para importar elementos a la base de datos.

Igualmente, se pueden definir los elementos constructivos. En la opción “Crear nuevo grupo”. Se crea una carpeta asociada a un grupo de elementos, por ejemplo, en la carpeta de materiales, en el nuevo grupo creado, mediante la opción “Crear material”, se puede definir un nuevo tipo de material como se puede ver en la figura B.6. De igual forma, se pueden crear y modificar elementos opacos, como son: materiales y productos, cerramientos y particiones. Pero también elementos semitransparentes, como son: vidrios, marcos, huecos y lucernarios.

## B. RESUMEN BÁSICO DE LA APLICACIÓN LIDER

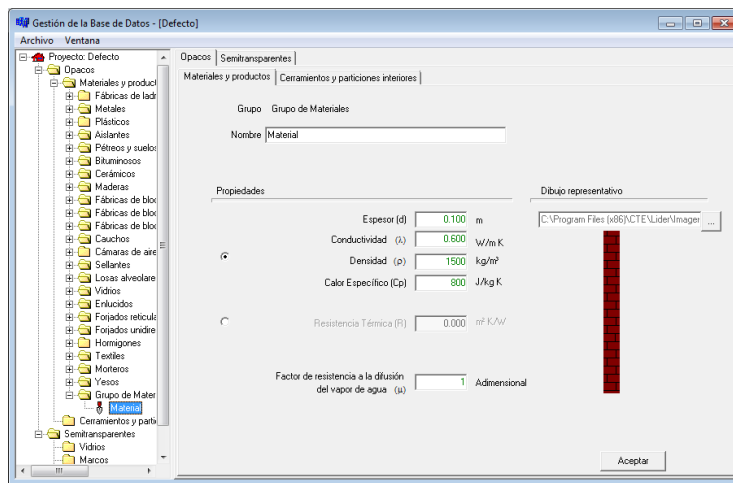


Figura B.6: Crear elementos en la base de datos.

Para la definición de los huecos, se debe escoger el tipo de vidrio y de marco que lo conforma, e indicar el porcentaje de área ocupada por el marco, si es una puerta y la permeabilidad al aire. En la figura B.7 se puede observar un ejemplo.

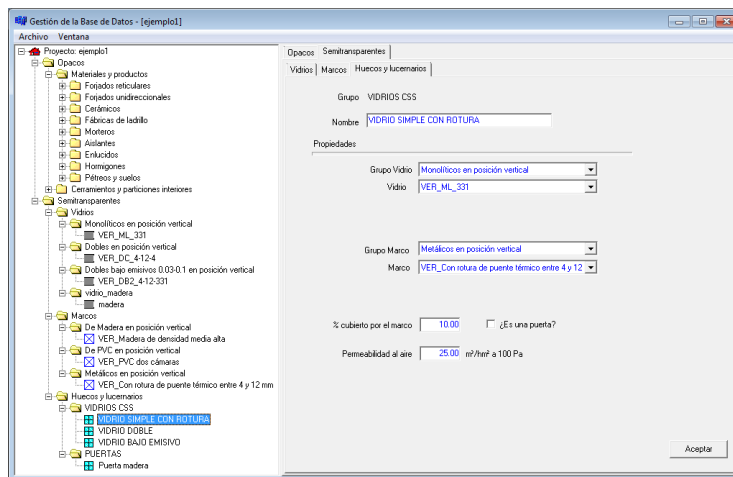
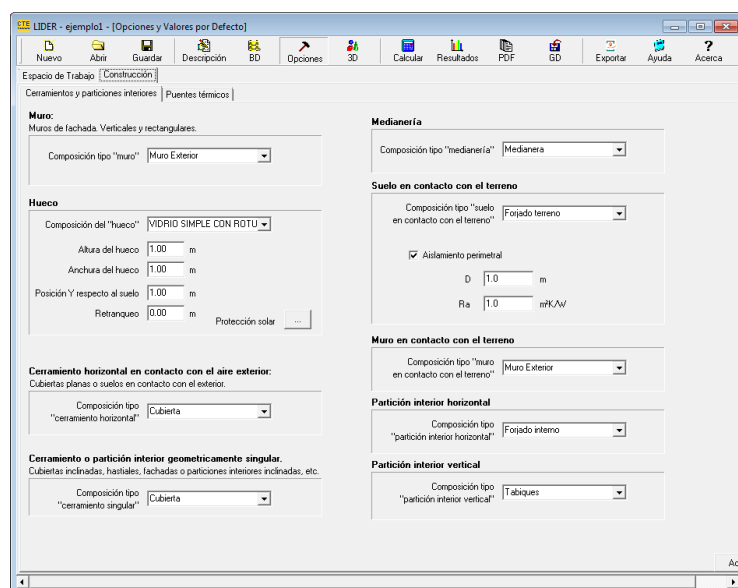


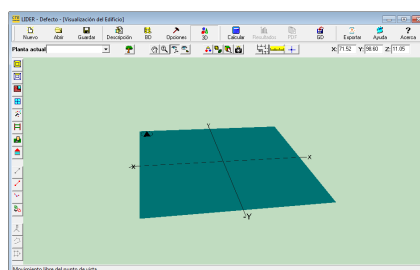
Figura B.7: Crear huecos en la base de datos.

Una vez creada y guardada la BD, en la ventana “Opciones”, aparecen diversas pestañas. La más importante, es la pestaña de “Construcción”, en ésta se asignan las funciones correspondientes a cada uno de los elementos constructivos (figura B.8).



**Figura B.8:** Apartado construcción.

A continuación, se define geoméricamente el edificio en el apartado “3D” (figura B.9).



**Figura B.9:** Espacio 3D.

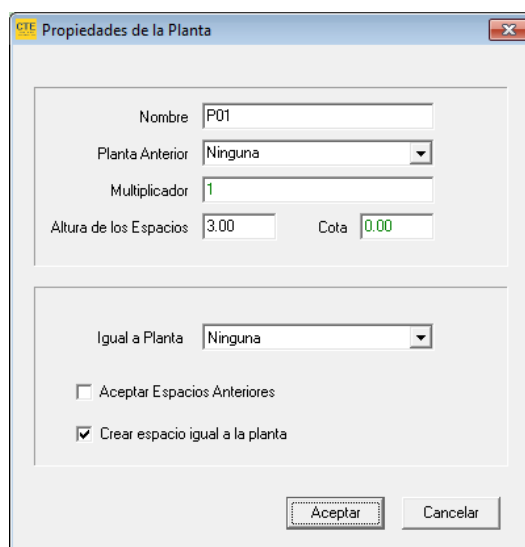
En este espacio, el arquitecto puede definir una planta indicando su cota, la altura de los espacios de cada piso, e incluso replicar plantas (figura B.10).

LIDER permite definir plantas de las siguientes tres formas. La primera forma es dibujar con el ratón sobre el plano de trabajo (figura B.10) los vértices que forman las plantas. La segunda forma es dibujando a partir de planos en formato DXF o BMP, y la tercera, más exacta y precisa, es mediante coordenadas.

Más adelante se procede a dividir la planta en espacios, mediante líneas auxiliares. El edificio se va construyendo y la herramienta permite visualizar el árbol

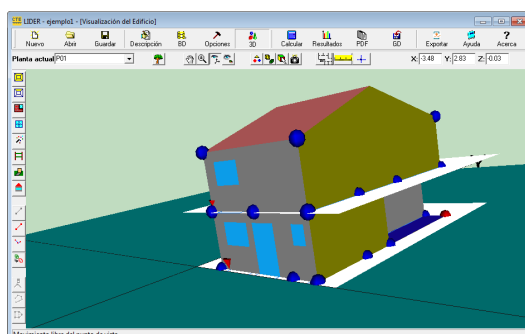
## B. RESUMEN BÁSICO DE LA APLICACIÓN LIDER

---



**Figura B.10:** Crear planta.

del edificio, donde se pueden observar los elementos que se han creado y editar las características de los mismos, tanto de elementos constructivos (comportamiento, huecos, etc.) como de espacios (tipo de espacio, tipo de uso, clase higrométrica, etc.). Todos los elementos necesarios para la edificación pueden ser creados: muros, huecos, ventanas, etc. De igual forma, se pueden definir los suelos, techos y cubiertas planas. Un vez finalizado el edificio, (ejemplo en figura B.11), se procede al cálculo de la limitación de demanda energética. Los resultados obtenidos se presentan en un archivo con formato PDF que contiene toda la información del edificio y sus respectivos resultados de demanda.



**Figura B.11:** Edificio.

APENDICE

# C

## **Ejemplo salida PDF del programa SEDICAE**

# **SEDICAE Proyecto ejemplo1**

**Documento generado por: Pablo, Sun Oct 06 13:14:08 CEST 2013**

**Este documento presenta la comparativa realizada por el programa SEDICAE.**

**Nota: Este documento es una versión preliminar.**



# 1. Comparativa

## 1.1. Calificación energética del edificio

Información CALIFICACIÓN ENERGÉTICA:

Tipo	Inicial	Final
Calificación energética	C	B
IEE de Emisiones de CO2 Totales	0,66	0,54

## 1.2. Calefacción

Información CALEFACCIÓN:

Tipo	Inicial	Final
Demanda de calefacción (kWh/m2)	16,92	4,95
Consumo de energía final de calefacción (kWh/m2)	27,81	8,14
Consumo de energía primaria de calefacción (kWh/m2)	28,09	8,22
Emisiones de CO2 de calefacción (kg/m2)	5,67	1,66
IEE de Demanda de calefacción	0,61	0,18
IEE de Emisiones de CO2 de calefacción	0,64	0,19

## 1.3. Refrigeración

Información REFRIGERACIÓN:

Tipo	Inicial	Final
Demanda de refrigeración (kWh/m2)	12,89	16,82
Consumo de energía final de refrigeración (kWh/m2)	6,55	8,55
Consumo de energía primaria de refrigeración (kWh/m2)	17,11	22,32
Emisiones de CO2 de refrigeración (kg/m2)	4,25	5,55
IEE de Demanda de refrigeración	0,39	0,5
IEE de Emisiones de CO2 de refrigeración	0,36	0,47

## 1.4. Costes

Información ESTIMACIÓN DE COSTES:

Tipo	Inicial	Final
Estimación del coste del Ciclo de Vida €	21.104,12	18.916,97
Inversión Total €	7.020,22	6.671,31
Coste del Sistema €	0	0
Coste de Inversión €/m <sup>2</sup>	42,7	40,58
Precio Total €	7.020,22	6.671,31
Coste de inversión de los Muros €	479,76	662,23
Coste de inversión de las Ventanas €	4.307,42	4.598,06
Coste de inversión de las Cubiertas €	313,67	594,24
Coste de inversión de los Suelos €	1.294,2	816,78
Coste de inversión de los Puentes Térmicos €	625,17	0

## 1.5. Calificación energética del edificio

Información SITUACIÓN:

Tipo	Inicial	Final
U de la Cubierta	0.57	0.23
U del Suelo	0.23	0.4
U de los muros	NORTE 0.49 NORESTE 0.0 ESTE 0.49 SURESTE 0.0 SUR 0.49 SUROESTE 0.0 OESTE 0.0 NOROESTE 0.0 LUCERNARIO 0.0	NORTE 0.32 NORESTE 0.0 ESTE 0.32 SURESTE 0.0 SUR 0.32 SUROESTE 0.0 OESTE 0.0 NOROESTE 0.0 LUCERNARIO 0.0
Ventanas	<NORTE <id:1 nombre:VER_ML_331 u:5.6 g:0.85 p:50.0 precio:212.0> porcentaje de área: 32.35> <ESTE <id:11 nombre:VER_DB3_4-15-4 u:1.4 g:0.7 p:9.0 precio:339.0> porcentaje de área: 0.0> <SUR <id:2 nombre:VER_DC_4-6-4 u:3.3 g:0.75 p:50.0 precio:220.0> porcentaje de área: 26.9>	<NORTE <id:6 nombre:VER_DB2_4-12-4 u:1.8 g:0.7 p:50.0 precio:231.0> porcentaje de área: 32.35> <ESTE <id:11 nombre:VER_DB3_4-15-4 u:1.4 g:0.7 p:9.0 precio:339.0> porcentaje de área: 0.0> <SUR <id:6 nombre:VER_DB2_4-12-4 u:1.8 g:0.7 p:50.0 precio:231.0> porcentaje de área: 26.9>

Tipo	Inicial	Final
Puentes Térmicos	OpcionTTL <id:2.0 opcion:2.0 tipo:<ESQUINA_CONCA VA_CERRAMIENTO 0.1 ESQUINA_CONVEXA_C ERRAMIENTO -0.15 UNION_CUBIERTA 0.25 ESQUINA_CONVEXA_F ORJADO 0.3 FRENTE_FORJADO 0.45 UNION_T_CERRAMIEN TO 0.15 PILAR 0.0 HUECO_VENTANA 0.15 ESQUINA_CONCAVA_T ERRENO 0.1 ESQUINA_CONVEXA_T ERRENO 0.0 CONTINUO_TERRENO 0.0 UNION_VERTICAL_ENT _EXT 0.0 UNION_SOLERA_PARE DEXT 0.15 MURO-EXT- AISLADO 0.0 OTROS 0.0 > precio:3.5>	OpcionTTL <id:1.0 opcion:1.0 tipo:<ESQUINA_CONCA VA_CERRAMIENTO 0.15 ESQUINA_CONVEXA_C ERRAMIENTO -0.15 UNION_CUBIERTA 0.45 ESQUINA_CONVEXA_F ORJADO 0.45 FRENTE_FORJADO 0.65 UNION_T_CERRAMIEN TO 0.15 PILAR 0.0 HUECO_VENTANA 0.4 ESQUINA_CONCAVA_T ERRENO 0.15 ESQUINA_CONVEXA_T ERRENO 0.0 CONTINUO_TERRENO 0.0 UNION_VERTICAL_ENT _EXT 0.0 UNION_SOLERA_PARE DEXT 0.15 MURO-EXT- AISLADO 0.0 OTROS 0.0 > precio:0.0>

# 1. Sistemas

## 1.1. Lista de sistemas

Información Sistemas:

Marca	Modelo	Energía	Consumo EP Calefacción	Consumo EP Refrigeración	Coste Ciclo de Vida	IEE de Emisiones de CO2 Totales	Calificación energética
TOSHIBA	MONZA PLUS 10	Electricidad convencional peninsular	1,16	4,02	8.777,73	0,23	A
TOSHIBA	AVANT 10	Electricidad convencional peninsular	1,35	5,11	8.977,31	0,24	A
TOSHIBA	MONZA PLUS 13	Electricidad convencional peninsular	1,27	4,81	9.057,65	0,24	A
TOSHIBA	AVANT 13	Electricidad convencional peninsular	1,35	5,19	9.071,2	0,24	A
TOSHIBA	DAISEIKAI V 07	Electricidad convencional peninsular	0,87	2,99	9.169,28	0,22	A
TOSHIBA	DAISEIKAI V 10	Electricidad convencional peninsular	0,92	3,2	9.330,5	0,22	A
TOSHIBA	SILVERSTONE 10	Electricidad convencional peninsular	1,16	4	9.498,14	0,23	A
TOSHIBA	MONZA PLUS 16	Electricidad convencional peninsular	1,37	5,21	9.522,72	0,24	A
TOSHIBA	DAISEIKAI V 13	Electricidad convencional peninsular	1,04	3,7	9.574,37	0,23	A

Marca	Modelo	Energía	Consumo EP Calefacción	Consumo EP Refrigeración	Coste Ciclo de Vida	IEE de Emisiones de CO2 Totales	Calificación energética
TOSHIBA	AVANT 16	Electricidad convencional peninsular	1,45	5,96	9.702,75	0,26	A
TOSHIBA	MONZA PLUS 18	Electricidad convencional peninsular	1,33	4,78	9.794,3	0,24	A
TOSHIBA	SILVERSTO NE 13	Electricidad convencional peninsular	1,33	4,66	9.890,03	0,24	A
TOSHIBA	DAISEIKAI V 16	Electricidad convencional peninsular	1,21	4,56	10.015,74	0,24	A
TOSHIBA	CASSETTE INVERTER 56	Electricidad convencional peninsular	1,42	5,41	10.364,36	0,25	A
TOSHIBA	SUZUKA INVERTER 56 B	Electricidad convencional peninsular	1,51	5,99	10.376,75	0,26	A
TOSHIBA	DAYTONA INVERTER 56 B	Electricidad convencional peninsular	1,27	5,24	10.382,6	0,24	A
TOSHIBA	DAISEIKAI V 18	Electricidad convencional peninsular	1,27	5,01	10.435,9	0,24	A
TOSHIBA	CASSETTE INVERTER PLUS 40 B	Electricidad convencional peninsular	1,2	4,67	10.456,79	0,24	A
TOSHIBA	SUZUKA SLIM INVERTER 56 B	Electricidad convencional peninsular	1,41	5,59	10.503,99	0,25	A
TOSHIBA	MONTECAR LO INVERTER 56 B	Electricidad convencional peninsular	1,45	6,12	10.545	0,26	A

Marca	Modelo	Energía	Consumo EP Calefacción	Consumo EP Refrigeración	Coste Ciclo de Vida	IEE de Emisiones de CO2 Totales	Calificación energética
TOSHIBA	MONZA PLUS 22	Electricidad convencional peninsular	1,45	5,59	10.563,5	0,25	A
TOSHIBA	LE MANS INVERTER 56 B	Electricidad convencional peninsular	1,51	6,3	10.636,97	0,26	A
TOSHIBA	CASSETTE INVERTER PLUS 45 B	Electricidad convencional peninsular	1,28	5,01	10.638,28	0,24	A
TOSHIBA	MONZA INVERTER 56 B	Electricidad convencional peninsular	1,45	5,59	10.660,5	0,25	A
TOSHIBA	DAYTONA INVERTER 80 B	Electricidad convencional peninsular	1,37	5,24	10.712,49	0,25	A
TOSHIBA	SUZUKA INVERTER 80 B	Electricidad convencional peninsular	1,49	5,99	10.714,97	0,26	A
TOSHIBA	SUZUKA SLIM INVERTER PLUS 40	Electricidad convencional peninsular	1,24	4,81	10.746,31	0,24	A
TOSHIBA	SILVERSTO NE 18	Electricidad convencional peninsular	1,54	5,59	10.757,46	0,25	A
TOSHIBA	SUZUKA INVERTER PLUS 56	Electricidad convencional peninsular	1,37	5,24	10.784,28	0,25	A
TOSHIBA	DAYTONA INVERTER PLUS 56 B	Electricidad convencional peninsular	1,07	4,66	10.816,96	0,24	A
TOSHIBA	SUZUKA SLIM INVERTER PLUS 45	Electricidad convencional peninsular	1,27	5,05	10.919,02	0,24	A

Marca	Modelo	Energía	Consumo EP Calefacción	Consumo EP Refrigeración	Coste Ciclo de Vida	IEE de Emisiones de CO2 Totales	Calificación energética
TOSHIBA	MONTECAR LO INVERTER PLUS 56 B	Electricidad convencional peninsular	1,3	5,24	10.919,2	0,25	A
TOSHIBA	CASSETTE INVERTER PLUS 56 B	Electricidad convencional peninsular	1,36	5,24	10.926,91	0,25	A
TOSHIBA	SUZUKA SLIM INVERTER PLUS 56	Electricidad convencional peninsular	1,27	5,24	11.008,6	0,24	A
TOSHIBA	MONTECAR LO INVERTER 80 B	Electricidad convencional peninsular	1,53	6,07	11.029,39	0,26	A
TOSHIBA	MONZA INVERTER PLUS 56B	Electricidad convencional peninsular	1,33	4,85	11.074,53	0,24	A
TOSHIBA	DAYTONA INVERTER PLUS 80 B	Electricidad convencional peninsular	1,18	4,4	11.182,16	0,23	A
TOSHIBA	SUZUKA INVERTER PLUS 80	Electricidad convencional peninsular	1,37	5,24	11.219,49	0,25	A
TOSHIBA	LE MANS INVERTER 80 B	Electricidad convencional peninsular	1,65	6,84	11.224,21	0,27	A
TOSHIBA	MONZA INVERTER 80 B	Electricidad convencional peninsular	1,54	5,94	11.407,56	0,26	A
TOSHIBA	DAYTONA INVERTER 110 B	Electricidad convencional peninsular	1,3	5,22	11.493,59	0,24	A

Marca	Modelo	Energía	Consumo EP Calefacción	Consumo EP Refrigeración	Coste Ciclo de Vida	IEE de Emisiones de CO2 Totales	Calificación energética
TOSHIBA	MONTECAR LO INVERTER PLUS 80 B	Electricidad convencional peninsular	1,34	5,24	11.499,29	0,25	A
TOSHIBA	MONZA INVERTER PLUS 80B	Electricidad convencional peninsular	1,45	5,24	11.679,25	0,25	A
TOSHIBA	SUZUKA INVERTER 110 B	Electricidad convencional peninsular	1,39	5,99	11.694,09	0,26	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST C 25	Biomasa	0	0	11.777,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST C 25	Pellets	0	0	11.777,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST C 25	Biomasa	0	0	11.777,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLA SSIC C AS 25	Gas Natural	0,05	8,64	11.799,49	0,29	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLA SSIC C AS 25	Gas Natural	0,05	8,64	11.799,49	0,29	A
TOSHIBA	MONTECAR LO INVERTER 110 B	Electricidad convencional peninsular	1,41	5,9	11.835,79	0,25	A
TOSHIBA	DAYTONA INVERTER PLUS 110 B	Electricidad convencional peninsular	1,03	3,72	11.854,88	0,23	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLA SSIC C 25	Gas Natural	0,05	8,64	11.956,49	0,29	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLA SSIC C 25	Gas Natural	0,05	8,64	11.956,49	0,29	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST C 25	Gas Natural	0,05	8,64	11.972,49	0,29	A



Marca	Modelo	Energía	Consumo EP Calefacción	Consumo EP Refrigeración	Coste Ciclo de Vida	IEE de Emisiones de CO2 Totales	Calificación energética
SAUNIER DUVAL	THEMACLA SSIC F AS 25	Biomasa	0	0	11.990,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLA SSIC F AS 25	Pellets	0	0	11.990,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLA SSIC F AS 25	Biomasa	0	0	11.990,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLA SSIC F 25	Biomasa	0	0	12.023,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLA SSIC F 25	Pellets	0	0	12.023,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLA SSIC F 25	Biomasa	0	0	12.023,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THEMA Nox F 25	Biomasa	0	0	12.109,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	ISOFAST C 35	Biomasa	0	0	12.181,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLA SSIC F AS 25	Gas Natural	0,05	8,64	12.185,21	0,29	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST F 25	Biomasa	0	0	12.186,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST F 25	Pellets	0	0	12.186,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST F 25	Biomasa	0	0	12.186,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST F 25	Biomasa	0	0	12.186,27	0,21	A
TOSHIBA	SUZUKA INVERTER PLUS 110	Electricidad convencional peninsular	1,23	4,95	12.187,58	0,24	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLA SSIC F 25	Gas Natural	0,05	8,64	12.218,21	0,29	A

Marca	Modelo	Energía	Consumo EP Calefacción	Consumo EP Refrigeración	Coste Ciclo de Vida	IEE de Emisiones de CO2 Totales	Calificación energética
TOSHIBA	MONTECAR LO INVERTER PLUS 110 B	Electricidad convencional peninsular	1,16	4,49	12.219,2	0,24	A
TOSHIBA	DAYTONA INVERTER 140 B	Electricidad convencional peninsular	1,35	5,24	12.249,82	0,25	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST C 30	Gas Natural	0,05	8,64	12.254,61	0,29	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST C 30	Gas Natural	0,05	8,64	12.254,61	0,29	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST F 30	Biomasa	0	0	12.324,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST F 30	Biomasa	0	0	12.324,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THEMAFAST F 25	Gas Natural	0,05	8,64	12.381,49	0,29	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLA SSIC F AS 30	Gas Natural	0,05	8,64	12.411,61	0,29	A
SAUNIER DUVAL	THEMACLA SSIC F AS 30	Gas Natural	0,05	8,64	12.411,61	0,29	A
SAUNIER DUVAL	ISOFAST F 30	Biomasa	0	0	12.475,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	ISOFAST F 30	Biomasa	0	0	12.475,27	0,21	A
TOSHIBA	MONTECAR LO INVERTER 140 B	Electricidad convencional peninsular	1,47	6,18	12.483,85	0,26	A
MET MANN	CL 30	Astillas de Madera	0	0	12.506,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	ISOFAST F 35	Biomasa	0	0	12.668,27	0,21	A

Marca	Modelo	Energía	Consumo EP Calefacción	Consumo EP Refrigeración	Coste Ciclo de Vida	IEE de Emisiones de CO2 Totales	Calificación energética
SAUNIER DUVAL	ISOFAST F 35	Biomasa	0	0	12.668,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	ISOFAST 21 CONDENS F 30	Pellets	0	0	13.173,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	ISOFAST CONDENS F 35	Gas Natural	0,05	8,64	13.286,01	0,29	A
SAUNIER DUVAL	ISOFAST CONDENS F 35	Gas Natural	0,05	8,64	13.286,01	0,29	A
SAUNIER DUVAL	ISOFAST 21 CONDENS F 35	Pellets	0	0	13.398,27	0,21	A
MET MANN	CL 50	Astillas de Madera	0	0	13.406,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	ISOMAX CONDENS 35	Pellets	0	0	13.755,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	ISOMAX CONDENS 35	Pellets	0	0	13.755,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THERMOMA STER CONDENS F 45	Gas Natural	0,05	8,64	14.301,07	0,29	A
SAUNIER DUVAL	THERMOMA STER CONDENS F 45	Gas Natural	0,05	8,64	14.301,07	0,29	A
MET MANN	GLUP24HT	Astillas de Madera	0	0	14.946,27	0,21	A
MET MANN	GLUP 24 HTLP	Astillas de Madera	0	0	15.300,27	0,21	A

Marca	Modelo	Energía	Consumo EP Calefacción	Consumo EP Refrigeración	Coste Ciclo de Vida	IEE de Emisiones de CO2 Totales	Calificación energética
MET MANN	GLUP 24 HTLP	Pellets	0	0	15.300,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THERMOMA STER CONDENS F 65	Gas Natural	0,05	8,64	15.356,07	0,29	A
SAUNIER DUVAL	THERMOMA STER CONDENS F 65	Gas Natural	0,05	8,64	15.356,07	0,29	A
MET MANN	GLUP29HT	Astillas de Madera	0	0	16.016,27	0,21	A
MET MANN	GLUP38HT	Astillas de Madera	0	0	16.146,27	0,21	A
KAPELBI	BIOMATIC +20	Pellets	0	0	16.196,27	0,21	A
KAPELBI	BIOMATIC +20	Gasóleo	0,05	9,23	16.478,37	0,32	A
MET MANN	GLUP 29 HTLP	Astillas de Madera	0	0	17.006,27	0,21	A
MET MANN	GLUP 29 HTLP	Pellets	0	0	17.006,27	0,21	A
MET MANN	GLUP 38 HTLP	Astillas de Madera	0	0	17.136,27	0,21	A
MET MANN	GLUP 38 HTLP	Pellets	0	0	17.136,27	0,21	A
KAPELBI	BIOMATIC +30	Pellets	0	0	17.341,27	0,21	A
KAPELBI	BIOMATIC +30	Gasóleo	0,05	9,23	17.623,37	0,32	A
SAUNIER DUVAL	THERMOSY STEM CONDENS 80/3	Gas Natural	0,05	8,64	17.670,11	0,29	A

Marca	Modelo	Energía	Consumo EP Calefacción	Consumo EP Refrigeración	Coste Ciclo de Vida	IEE de Emisiones de CO2 Totales	Calificación energética
SAUNIER DUVAL	THERMOSY STEM CONDENS 80/3	Gas Natural	0,05	8,64	17.670,11	0,29	A
MET MANN	PB 28/ CB 28	Pellets	0	0	17.722,27	0,21	A
MET MANN	CB-20	Pellets	0	0	18.221,58	0,21	A
MET MANN	GLUP58HT	Astillas de Madera	0	0	18.506,27	0,21	A
KAPELBI	BIOMATIC +50	Pellets	0	0	18.801,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THERMOSY STEM CONDENS 120/3	Gas Natural	0,05	8,64	18.960,11	0,29	A
SAUNIER DUVAL	THERMOSY STEM CONDENS 120/3	Gas Natural	0,05	8,64	18.960,11	0,29	A
KAPELBI	BIOMATIC +50	Gasóleo	0,05	9,23	19.083,37	0,32	A
MET MANN	PB 35/ CB 35	Pellets	0	0	19.092,27	0,21	A
MET MANN	GLUP82HT	Astillas de Madera	0	0	19.366,27	0,21	A
MET MANN	PB 50/ CB 50	Pellets	0	0	19.654,27	0,21	A
MET MANN	GLUP 58 HTLP	Astillas de Madera	0	0	19.686,27	0,21	A
MET MANN	GLUP 58 HTLP	Pellets	0	0	19.686,27	0,21	A
HERZ	PELLETSTA R20	Pellets	0	0	19.694,27	0,21	A
BIOTECH	PZ25RL	Pellets	0	0	20.179,27	0,21	A
HERZ	PELLETSTA R 30	Pellets	0	0	20.288,27	0,21	A

Marca	Modelo	Energía	Consumo EP Calefacción	Consumo EP Refrigeración	Coste Ciclo de Vida	IEE de Emisiones de CO2 Totales	Calificación energética
MET MANN	GLUP 82 HTLP	Astillas de Madera	0	0	20.646,27	0,21	A
MET MANN	GLUP 82 HTLP	Pellets	0	0	20.646,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THERMOSY STEM CONDENS 160/3	Gas Natural	0,05	8,64	20.761,11	0,29	A
SAUNIER DUVAL	THERMOSY STEM CONDENS 160/3	Gas Natural	0,05	8,64	20.761,11	0,29	A
BIOTECH	PZ35RL	Pellets	0	0	21.477,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THERMOSY STEM CONDENS 200/3	Gas Natural	0,05	8,64	21.753,98	0,29	A
SAUNIER DUVAL	THERMOSY STEM CONDENS 200/3	Gas Natural	0,05	8,64	21.753,98	0,29	A
KAPELBI	PE 25	Pellets	0	0	22.226,27	0,21	A
SAUNIER DUVAL	THERMOSY STEM CONDENS 240/3	Gas Natural	0,05	8,64	24.343,98	0,29	A
SAUNIER DUVAL	THERMOSY STEM CONDENS 240/3	Gas Natural	0,05	8,64	24.343,98	0,29	A
SAUNIER DUVAL	THERMOSY STEM CONDENS 280/3	Gas Natural	0,05	8,64	25.744,98	0,29	A

Marca	Modelo	Energía	Consumo EP Calefacción	Consumo EP Refrigeración	Coste Ciclo de Vida	IEE de Emisiones de CO2 Totales	Calificación energética
SAUNIER DUVAL	THERMOSY STEM CONDENS 280/3	Gas Natural	0,05	8,64	25.744,98	0,29	A
HERZ	PELLETSTA R 45	Pellets	0	0	26.718,58	0,21	A
HERZ	PELLETSTA R 60	Pellets	0	0	27.229,58	0,21	A

## **Declaración**

Por la presente declaro que he producido esta obra sin la ayuda prohibida de terceros y sin hacer uso de las ayudas que no sean las especificados, las nociones asumidas directa o indirectamente de otras fuentes han sido identificadas como tal. Este trabajo no ha sido previamente presentado de manera idéntica o similar a cualquier tribunal examinador.

El trabajo de tesis se realizó durante el año 2013 bajo la supervisión del Dr.D. José Guadix Martín en la Universidad de Sevilla.

Sevilla,



Este documento fue finalizado en Sevilla a 17 de Diciembre de 2013.

